

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R SM.1046-3 建议书
(09/2017)

**无线电系统频谱使用
和效率的定义**

**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。

目录

页码

附件1 – 频谱利用因子和频谱效率评估的一般标准.....	3
1 频谱利用因子.....	3
2 频谱利用效率(SUE).....	4
3 相对频谱效率(RSE).....	5
4 频谱效率的比较.....	6
附件2 – 应用于不同服务的频谱使用示例.....	6
1 应用于陆地移动无线电系统的频谱.....	6
1.1 室内微微蜂窝无线电系统的频谱效率.....	6
1.1.1 覆盖建筑物的微微蜂窝系统.....	6
1.1.2 覆盖市区的微微蜂窝系统.....	7
1.2 陆地移动无线电系统的相对频谱效率.....	8
1.3 陆地移动无线电系统的频谱利用效率.....	9
1.3.1 占用和禁用频谱指数的计算.....	11
1.3.2 结果.....	12
1.4 陆地移动无线电系统的频谱利用效率(基于测量的方法).....	15
1.5 陆地移动无线电系统的频谱利用效率(替代方法).....	15
1.5.1 引言.....	15
1.5.2 有用效果的定义.....	16
1.5.3 频谱利用因子的定义.....	16
1.5.4 频谱利用效率的计算.....	17
1.5.5 频谱密度设置(频谱利用因子计算的一种替代方法).....	17
1.5.6 频谱利用的现状.....	19
2 应用于无线电中继系统的频谱.....	20
2.1 引言.....	20
2.2 在节点处有分支链接的长动脉的频谱利用效率.....	21

2.3	随机排列的无线电中继链路的频谱利用效率	22
2.3.1	公式	22
2.3.2	应用：2 GHz频带无线电中继系统的频谱效率	24
2.3.3	在随机网格状网络中的SUE	26
2.4	评估数字无线电中继系统新技术的频谱节约特性	29
2.4.1	引言	29
2.4.2	天线	30
2.4.3	调制	32
2.4.4	信号处理	35
2.4.5	错误校正/编码	35
2.4.6	适配/横向均衡器	36
2.4.7	错误校正/编码和适配均衡器	37
2.4.8	小结	37
2.5	单跳农村无线电中继的RSE	38
2.6	点对点(p-p)系统的频谱使用	38
2.6.1	引言	38
2.6.2	点对点系统效用的定义	39
2.6.3	点对点系统频谱利用因子的定义	40
2.6.4	点对点系统的SUE 的计算	42
3	电视和声音广播系统的频谱利用	46
3.1	引言	46
3.2	电视广播系统的效用的定义	46
3.3	电视广播系统的频谱利用因子的定义	48
3.4	电视广播系统SUE的计算	49
3.5	评估声音广播系统SUE的注释	49

ITU-R SM.1046-3 建议书
无线电系统频谱使用和效率的定义

(1994-1997-2006-2017年)

范围

本建议书从理论角度、并通过测量模型对无线电系统频谱使用和效率进行定义。

关键词

无线电通信、频谱效率、频谱利用

缩略语/术语表

AM-SSB	调幅 - 单边带
BER	误码率
C/N	载噪比
CHR	锥角反射器
CSD	载波频谱密度
EMC	电磁兼容性
FEC	前向纠错
FM	调频
MTES	理论上最有效的系统
OCR	关闭信道抑制
P-P	点对点
PSK	移相键控
PCM	脉冲编码调制
QAM	正交振幅调制
RSE	相对频谱效率
SHD	遮蔽式抛物面
SSD	频谱设置密度
STD	标准抛物面
SUE	频谱利用效率
TIA	美国电信工业协会
UHF	超高频率
VHF	特高频率

相关ITU建议书及报告

ITU - R F.699建议书 – 在100 MHz到70 GHz左右频率范围内进行协调研究和干扰估算用的固定无线系统天线的参考辐射图

ITU - R P.530建议书 – 设计地面视距系统所需的传播数据和预测方法

ITU - R SM.1047建议书 – 国家频谱管理

ITU - R SM.1880建议书 – 频谱占用度测量和评估

ITU - R SM.2015报告 – 确定国家长期频谱利用战略的方法

ITU - R SM.2256报告 – 频谱占用度的测量和评估

注 – 在任何情况下均应采用现行建议书/报告的最新版本。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 频谱是有限的自然资源，具有巨大的经济和社会价值；
- b) 频谱使用的需求正在快速增长；
- c) 一系列不同的因素，例如特定的无线电业务使用不同的频段、与这些业务的网络相关的频谱管理方法、发射机的技术特性、业务中使用的接收机和天线等，都很大程度地影响频谱的使用和效率，而通过对这些因素的优化，特别是新的或改进的技术，可以明显改善频谱使用的经济性；
- d) 需要定义频谱使用的程度和效率，将其作为评估新的或改进的技术所带来的收益、特别是主管部门在制定频谱利用和发展无线电通信的国家长期规划时的比较和分析工具；
- e) 在开发新的或改进技术以及评估现有系统的性能时，在实际无线电系统之间进行频谱效率的比较是非常有用的。

建议

- 1 作为基本概念，应使用带宽-空间-时间域的组合-即附件1中阐述的发射和接收无线电设备的“频谱利用因子”作为频谱利用的度量；
- 2 如附件1所述，频谱利用效率（SUE）（或简称频谱效率）的计算基础，是确定有用效果（该等有用效果由无线电系统通过频谱利用和频谱利用因子获得）。附件2中给出了如何使用这些概念的例子；
- 3 应使用附件1中阐述的相对频谱效率的基本概念来比较不同无线电系统间的频谱效率；
- 4 任何频谱效率的比较仅应在提供相同的无线电通信业务的相似类型的无线电系统间进行，见附件1中§4的解释；
- 5 在确定频谱效率时，应考虑在特定的电磁环境下不同无线电系统和网络间的相互作用。

附件1和附件2提供了理论模型（U），测量模型（U'）及应用于不同业务的频谱使用示例。

附件1

评估频谱利用因子和频谱效率的通用准则

1 频谱利用因子

频谱（在其他事物之间）的有效使用可以通过很多方式取得，这其中包括通过天线的方向性、地理间隔、频率共用，或使用正交频率以及时间共用或时间分割获得的隔离，所有这些考虑都反映在频谱利用的定义上。因此，频谱利用的度量—频谱利用因子U定义为对其他潜在的用户禁用的频率带宽、几何（地理）空间和时间的乘积：

$$U=B \cdot S \cdot T \quad (1)$$

其中：

B: 频率带宽

S: 几何空间（通常是区域）

T: 时间。

所指的几何空间可以是一个立体空间、一条线（如对地静止轨道），或一个围绕一点的扇形区域。禁用空间的大小取决于频谱的功率密度。对许多应用来说，时间维可以忽略，因为业务是连续操作的。但是在某些业务中，例如，广播和单信道移动业务，时间因子对于共用是很重要的，三种因子应同时考虑并进行优化。

频谱的度量可以用发射使用的带宽（如占用带宽）和它的干扰面积的乘积来计算，或者将发射的功率谱密度的实际形状和天线辐射特性考虑在内。

传统上，无线电发射机被认为是频谱资源的用户。它们使用频谱空间，在其中填充一定的无线电功率—功率大到其他系统的接收机由于存在不可接受的干扰而在一定的位置、时间和频率上不能工作。应注意发射机的禁用空间是针对接收机的。这是一个简单的事实，包含功率的空间不能阻止其他的发射机向同一地点发射功率，即发射机不能阻止另外的发射机工作。

接收机使用频谱空间，因为它们使发射机无法再使用相同的频谱空间。接收机本身的操作不会干扰任何人（除非它不留意被当作发射机或功率源）。即使如此它本身使用的物理空间也相对较小。可是，管理机构为了保证无干扰的接收，不会给发射机发执照。保护可以是空间上（分隔距离，协调距离）的、频率上（保护带）的或甚至在时间上的（在美国，某些

MF广播电台只限于白天操作)。这些禁用构成了接收机对空间的“使用”。射电天文频带是认识接收机使用频谱空间的熟知的例子。

将这些事实合并成一个度量频谱空间单位的方法是把资源分成两个空间—发射机空间和接收机空间—并定义双重的单位来度量每个空间。在这里简单是最重要的，两个单位可以合并成一个供系统使用单一的度量。

有关计算频谱利用因子的通用方法的进一步信息见《国家频谱管理手册》第8章（2005年，日内瓦）。

2 频谱利用效率（SUE）

按照无线电通信系统的SUE（或简称为频谱效率）的定义，它可以表示为：

$$SUE = \{M, U\} = \{M, B \cdot S \cdot T\} \quad (2)$$

其中：

M ： 通过一段距离传输的信息量

U ： 该系统的频谱利用因子。

如果必要，复杂的频谱效率指标可以减为一个简单的指标：效用与频谱利用因子之比：

$$SUE = \frac{M}{U} = \frac{M}{B \cdot S \cdot T} \quad (2a)$$

等式（2）和（2a）为频谱利用效率的理论计算方法。当主管部门独立评估SUE时，借助通信系统（分子 M ）获得的有用效果并非总是可用。在该等情况下，可以根据实际测量值（ U' ）将其替换为频谱利用因子：

$$U' = B' \cdot S' \cdot T' \quad (2b)$$

其中：

B' ： 占用带宽的实际测量结果（或区域统计）

S' ： 覆盖面的实际测量结果（或区域统计）

T' ： 运行时间的实际测量结果（或区域统计）。

无线电管理部门可通过其监测设施进行测量和统计，获得上述三个参数。就区域统计而言，例如，可用每个子区域测量结果的算术平均值。

频谱利用效率则可表示为：

$$SUE = \frac{U'}{U} = \frac{B' \cdot S' \cdot T'}{B \cdot S \cdot T} \quad (2c)$$

3 相对频谱效率 (RSE)

相对RSE的概念可以有效地用来比较两个相似类型的提供同一业务的无线电系统的频谱效率。

RSE定义为两个频谱效率的比，其中一个作为比较基准的系统的效率。因此，

$$RSE = SUE_a / SUE_{std} \quad (3)$$

其中：

RSE ： 相对频谱效率 (SUE的比)

SUE_{std} ： “标准”系统的SUE

SUE_a ： 实际系统的SUE。

可能入选的标准系统是：

- 理论上最有效的系统，
- 容易定义和理解的系统，
- 广泛使用的系统—一个事实上的产业标准。

RSE是个从0到无穷大的正数。如果把标准系统选择为理论上最有效的系统，RSE的典型范围为0到1。

举例来说，理论上最有效的系统的特性是符合信息论的原理的。用户或收听者接收到有用通信的通信信道的通信容量由以下关系式决定：

$$C_0 = F_0 \ln(1 + \rho_0)$$

其中：

F_0 ： 有用通信的带宽

ρ_0 ： 接收机输出端的信噪比。

如接收机输入端的信噪比等于保护比 ρ_s ，并且信号发射所通过的通信信道的带宽等于 F_m ，那么通信容量为 $C_p = F_m \ln(1 + \rho_s)$ 。它必须超过或至少等于用户接收一个有用通信的信道的通信容量，即 $C_p \geq C_0$ 。因此用户收到信噪比为 ρ_0 的通信的保护比 ρ_s 的最小可能值定义为：

$$\rho_s = (1 + \rho_0)^{F_0/F_m} - 1 \quad (4)$$

直接计算RSE的优势是通常比计算SUE更简单。因为系统提供同一个业务，它们通常有很多共同的因子（有时甚至是相同的物理元件）。这意味着许多因子将要在实际计算前“删除”掉。通常这将很大程度地减少计算的复杂性。

一些RSE计算的例子见附件2和《国家频谱管理手册》第8章（2005年，日内瓦）。

4 频谱效率的比较

正如前一节所述，可以对几个不同的系统计算SUE值，并可以进行比较以获得系统的相对效率。但是对于这样的比较在实际操作中要小心。例如，一个陆地移动无线电系统和一个雷达系统计算得到的SUE有很大的不同。这两个系统中的信息传输率、接收机和发射机大不一样，这两者的SUE是不成比例的。对它们进行比较没有太大用途。因此，比较频谱效率应在相同类型并提供同一无线电通信业务的系统中进行。对同一系统的频谱效率或利用进行时间上的比较是很有益的，可以看出该系统在所研究的特定方面内是否有改进。

同时应该注意到虽然频谱的效率是一个重要的因素，它可以利用无线电频谱中开展最多的业务量，但它不是应考虑的唯一因素。其他在选择技术或系统时应考虑的因素包括费用、设备的可用性、与现有设备的兼容性和技术、系统的可靠性和操作因素等。

附件2

应用于不同业务的频谱使用示例

1 陆地移动无线电系统的频谱使用

1.1 一个室内微微蜂窝无线电系统的频谱效率

在频带为900 MHz到60 GHz的室内微微蜂窝系统中，频谱效率可从公式（2）中得到。室内微微蜂窝无线电系统的频谱效率可定义如下：

$$\text{爱尔兰} / (\text{带宽} \times \text{面积}) \quad (5)$$

其中爱尔兰是微微蜂窝系统的总的语音话务量，带宽是由系统使用的频谱总量，区域是系统覆盖的总服务区。因为微微蜂窝系统是在高层建筑中安装的，因此在频谱效率的计算中使用总的地面面积。每个小区所需要的信道数目可以根据楼层用户数和每用户的话务量，按爱尔兰B表计算。

1.1.1 覆盖一座建筑物的微微蜂窝系统

为了计算整个建筑物所要求的总带宽，需要知道楼层的垂直复用距离。这个参数由楼层损耗决定，不同类型的楼是不同的。

接着可以计算出建筑物所需要的半双工信道的总数，它等于：

$$2 \times \text{每小区的信道数} \times \text{每楼层小区数} \times \text{分隔的楼层数}$$

这里因子2用来反映双向通信需要的信道数量。

覆盖建筑物的系统的频谱效率， $SUE_{\text{建筑物}}$ ，使用公式（5）计算：

$$SUE_{\text{建筑物}} = \frac{\text{整个建筑物内总的话务量}}{\text{总的信道数} \times \text{信道带宽} \times \text{总的楼层面积}} \quad (6)$$

例如：

工作在900 MHz的室内系统中

一个信道（半双工）带宽	25 kHz
每小区信道数	10
每层小区数	4
分隔的楼层数	3
需求的总信道数	120

在服务等级为0.5%时，基站和移动站在一层的总话务量= $T_f = 16E$ 或 $2T_f$ 。

$$SUE_{\text{建筑物}} = \frac{16 \times \text{楼层数}}{120 \times 0.025 \times \text{总的楼层面积}} \quad (7)$$

如果楼层是25 m乘55 m， $SUE_{\text{建筑物}} = 3880 \text{ E/MHz/km}^2$ 。

1.1.2 覆盖市中心的微微蜂窝系统

类似地，当水平复用距离已知时，整个市中心区要求的带宽也可以计算。同样，这个参数依赖于建筑材料和信号进出大楼的传播损耗。复用距离直接影响可放在一个分组（或干扰组）内的建筑物的数量。

在这种情况下，在市中心区需要的半双工信道的总数等于：

$$2 \times \text{每座建筑物的信道数} \times \text{每个分组中的建筑物的数量}$$

同样因子2也是反映计算的是双向通信所需的信道数量。

为整个市中心提供覆盖的系统的频谱效率 $SUE_{\text{区}}$ ，可使用公式（5）计算：

$$SUE_{\text{区}} = \frac{\text{整个区域的总的话务量}}{\text{总的信道数} \times \text{信道带宽} \times \text{服务区总面积}} \quad (8)$$

这里，服务区的总面积是被微微蜂窝系统覆盖的建筑物的总的楼层面积。

例如：

这个室内系统工作在900 MHz

每座大楼的信道数	120
每个分集的大楼数	4
（半双工）信道带宽	25 kHz
需要的总信道数	480

$$SUE_{\text{区}} = \frac{16 \times \text{楼层数} \times \text{建筑物的数量}}{120 \times 4 \times 0.025 \times \text{总的楼层面积}} = 970E / \text{MHz/km}^2 \quad (9)$$

注1 – 其他资料见：

CHAN, G. and HACHEM, H. [September, 1991] Spectrum efficiency of a pico-cell system in an indoor environment. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Quebec City, Canada.

HATFIELD, D.N. [August, 1977] Measures of spectral efficiency in land mobile radio. *IEEE Trans. Electromag. Compt.*, Vol. EMC-19, 3, 266-268.

1.2 陆地移动无线电系统的RSE

可以将不同调制类型的陆地移动无线电系统的RSE值与理论上最有效的系统作比较（见附件1，第3节和公式（4））。

为了简便和获得有限大的分析表达式，计算采用最简单的网络模型，理想的矩形格子的形式，并使用典型的UHF波段传播条件。但是，得到的规律与使用更复杂的实际的网络模型和更精细的传播模式的情况是一致的。

网络模式由大小相同的正方形构成，基站位于正方形的中心（见图1）。这个服务区的大小（半径）， r ，认为是给定的。在图1中，如果区域间的分隔距离 R 提供足够的干扰衰减，标号相同的区域可以使用相同的一组频道。基站的天线在水平面是没有方向性的，并且仅使用一种极化方式。

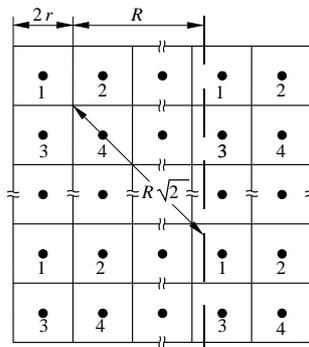
在这一模型中，所有的基站发射机都有同样的功率和稳定的载频，不产生任何带外或杂散辐射；基站接收机有理想的选择特性。

图2中给出了对几种特殊类型调制和接收机输出端不同信噪比 ρ_0 的RSE计算结果。考虑的调制类型有：

- 幅度调制—单边带（AM-SSB），
- 频率调制（FM），
- 4（8）相相移键控（4（8）PSK），
- 16相积分幅度调制（16-QAM）。

图1

网络模型



从图2可以看出，FM陆地移动系统有最低的RSE，因为使用这种类型的调制时，网络所需要的带宽比理论上最有效的系统（MTES）的带宽大约宽5倍。另一方面，所有的噪声保护比的值中最接近MTES情况的调制类型是16-QAM。对于这种网络，它要求的带宽仅是MTES所需带宽的1.5倍。如果接收质量要求的不是很高，与MTES最接近的是AM-SSB。可是，当接收质量要求提高时，特别是考虑到实际发射机的频率不稳定性，AM-SSB的RSE就会相应降低。

注1 – 其他资料见：662-3号报告的附件IV（1990年，杜塞尔多夫）。

1.3 陆地移动无线电系统的SUE

对一般的调度陆地移动无线电系统，SUE可以用公式（2）的方法获得：

$$SUE = \frac{M}{B \cdot S \cdot T} = \frac{Occ}{B \cdot S} \quad (10)$$

其中：

- B : 所考虑的陆地移动频带的总频谱，
- S : 研究区域，和
- Occ : 区域内的总占用
= 每发射的占用×区内发射的数量= M/T 。
= 已传递信息/有效时间。

区域因素的总占用度

$$Occ = \frac{M}{T} \quad (11)$$

其中：

- M : 已传递信息
- T : 有效时间。

对于一般调度陆地移动无线电系统，受影响的地理区域可表示为小区矩阵。（分为一个 $i \times j$ 矩阵，矩阵的大小是 m ）。每个小区被定义为 S_0 。地理区域内有 n 个电台。因此， Occ 可由以下方程确定：

$$Occ = \sum_0^m F_n = \sum_0^{i \times j} F_n(i, j) \quad (12)$$

其中：

- m : 矩阵的大小($i \times j$)
- $F_n(i, j)$: 各单元格总占用度（矩阵的单位面积）。

根据发射功率和传播特性，发射信号将覆盖一定的区域，在这种情况下为一定数量的小区。如果小区中覆盖区域的比例达到给定阈值，则认为该小区已被占据。因此，

$$\eta = \frac{\sum_{n=1}^n S_n}{S_0} \quad (n \geq 1) \quad (13)$$

其中：

S_0 ：小区的面积

S_n ：小区内当前站的覆盖面积。

且当 $n=0$, $\eta = 0$ 。

一般来说，如果覆盖面积占小区面积的10%以上，则视其为占据区域。小区的总占据量为：

$$F_n(i, j) = \frac{M_n}{T_n} \quad (\eta \geq 0.1) \quad (14)$$

其中：

M_n ：该站传送的信息

T_n ：小区的有效时间。

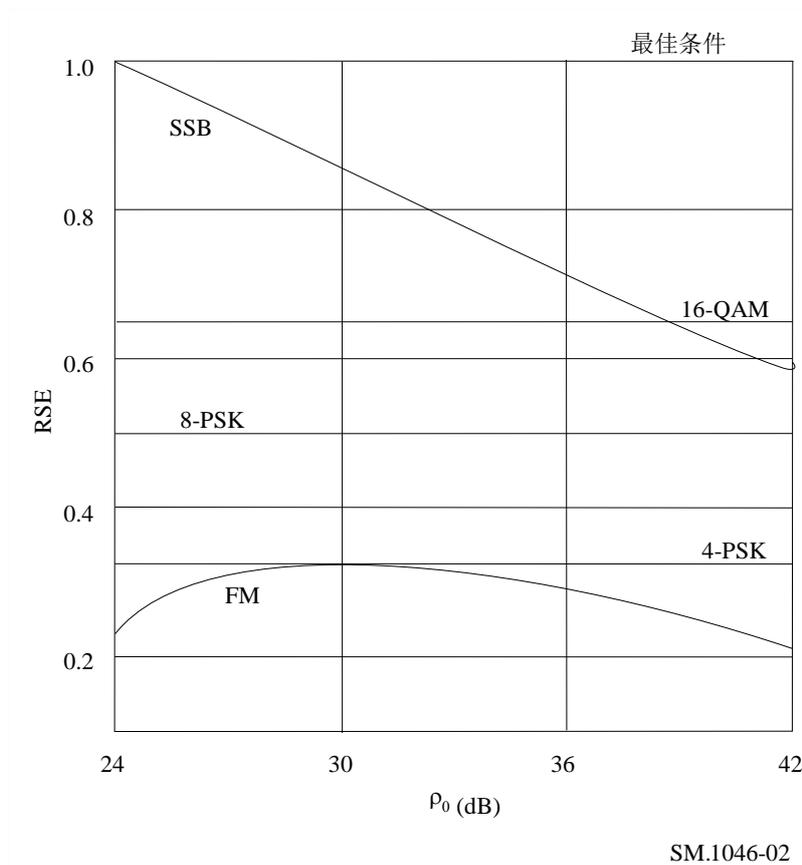
SUE小区指数定义为该地理区域中所有 n 个站点在小区中的总占用量除以所考虑的频谱总量 B 和单元格面积。因此，一个地理区域的SUE平均指数可通过城市的总占有量除以所考虑的频谱总量和总面积 S 获得。

$$\text{单元格-指数} = \frac{F_n}{B \cdot S_0} \quad (15)$$

$$\text{平均-指数} = \frac{Occ}{B \cdot S} \quad (16)$$

重点是计算区域内的总占用。采取的方法是将所研究的区域分割成一系列小区，小区内
有基站。根据发射机功率和传播特性，发射信号将覆盖一特定区域，在这里，是一定数量
的小区。因此，通过将
这些信号覆盖的小区相加，就可以计算发射的占用情况。可是，如果多个基站共享同一
频率，应将占用除以共用相同频率的基站的数量。应将所有的基站计算在总的发射数目
中。

图2
一个网络中不同调制类型的RSE



在本例中，76 km乘76 km的地理区域在计算中代表一个小区矩阵。每个小区定义为2 km乘2 km的面积。用参数d定义覆盖圈（在下一节中详细解释），如果覆盖圈占用的面积超过小区面积的10%，就认为小区被占用了。由频带内的各个有效执照或电台可以得到总的占用。

1.3.1 占用和禁用频谱指数的计算

在此分析中，计算占用频谱指数和混合占用及禁用频谱指数。前者提供一个给定频带的频谱利用的度量，后者显示频谱是如何被占用而不能被其他用户使用的。

如上节所描述的，在计算指数时，首先是按照ITU-R P.529建议书估计覆盖距离值d:

$$L(d, f, h_t, h_r) = P_t + G_r - P_{ibm} - OCR(\Delta f) \tag{17}$$

其中:

- $L(d, f, h_t, h_r)$: 传播模型
- P_t : e.i.r.p. (dBW)
- G_r : 接收天线的增益 (dB)

- P_{ibm} : 移动台的平均接收功率 (dBW)
 OCR : 频偏抑制
 f : 发射机频率 (MHz)
 h_t : 基站天线高度 (m)
 h_r : 移动天线高度 (m)

为获得占用频谱指数, $OCR(\Delta f)$ 等于零。

为计算各种频率分离条件下的 d , 须使用不同的 $OCR(\Delta f)$ 值。

例如, ITU-R 建议书 p.529 中 Okumura-Hata 传播模型, d 小于 20km, 可计算如下:

$$d = \text{anti log} \left[\frac{P_t + G_r - P_{ibm} - OCR(\Delta f) - 26.16 \log f + 13.82 \log h_t + (1.1 \log f - 0.7) h_r - (1.56 \log f - 0.8)}{44.9 - 6.55 \log h_t} \right] \quad (18)$$

基站天线假设是全向的。需要使用小区矩阵中决定覆盖区圆心位置的基站的坐标。

为了获得占用频谱的指数, 假定 P_{ibm} 为 -128 dBW 并且 $OCR(\Delta f)$ 等于零。

对于陆地移动无线电系统, 我们不仅对占用频谱指数感兴趣, 而且对禁用频谱指数感兴趣。禁用频谱的出现是由于特定基站的干扰。在与基站的一定距离间隔内指配频率的相邻信道不能使用。在这些参数中, 距离间隔取决于频率间隔。为了计算不同频率间隔下的间隔距离, P_{ibm} 假设为 -145 dBW, 并且 $OCR(\Delta f)$ 设定为不同的值。

根据带外发射的掩模, 使用的 OCR 因子 (dB) 的值在信道的偏移为 Δf (kHz) 时为:

Δf	0	± 25	± 50	± 75	± 100
OCR	0	57.1	58.6	58.6	58.6

由于使用了这些值, 就有可能获得与实际传播条件相接近的距离, 从一组抽样数据中, 按照覆盖距离的计算, 占用距离是 21.9 km。相应 $\Delta f = 0, \pm 25$ kHz, ± 50 kHz 及大于它的禁用距离分别是 69.2 km, 1.5 km, 和 1.3 km。

1.3.2 结果

为了说明这种计算 SUE 的方法, 我们给出在 138-174 MHz 频带, 针对 10 个加拿大城市中心附近 5 776 km² 区域的计算结果。表 1 包括占用频谱指数、禁用以及占用频谱指数。

用来决定总占用的数据是从加拿大的频率指配和执照系统数据库中获得的。

在这个研究中考虑的陆地移动频带包括 138-174 MHz VHF 频带和 406-430 MHz 与 450-470 MHz 的 UHF 频带。VHF 频带的信道间隔是 30 kHz, UHF 频带为 25 kHz。

表1
占用和禁用指数 (138 - 174 MHz)

E/kHz/km ² ×10 ⁻³	占用和禁用指数	占用指数
多伦多	4.19	1.33
渥太华	4.54	1.30
温莎	3.68	0.87
蒙特利尔	3.56	0.88
圣约翰	3.24	0.65
哈利法克斯	3.32	0.68
温哥华	3.20	0.62
温尼伯	3.31	0.74
卡尔加里	3.05	0.73
埃德蒙顿	2.99	0.60

图中结果是温哥华市的，也是在138-174 MHz频带。对于禁用及占用的频谱，图3显示的是一个3维可视的数值矩阵。矩阵覆盖在一张城市图上，频谱利用信息与地图上的详细信息一起显示。这种表示方法大大地加强了我们的解释这些信息的能力。如图4所示，在城市的中心，一个小区占用频谱的最大值是 $1.7 \times 10^{-3} \text{ E/kHz/km}^2$ 。一个小区禁用及占用这段频谱的最大值是 $4.9 \times 10^{-3} \text{ E/kHz/km}^2$ ，它仅仅位于中心的北部和西部，如图5所示。这个区是温哥华市中心稠密的商业区。

图3

温哥华市占用及禁用频谱指数的三维显示图

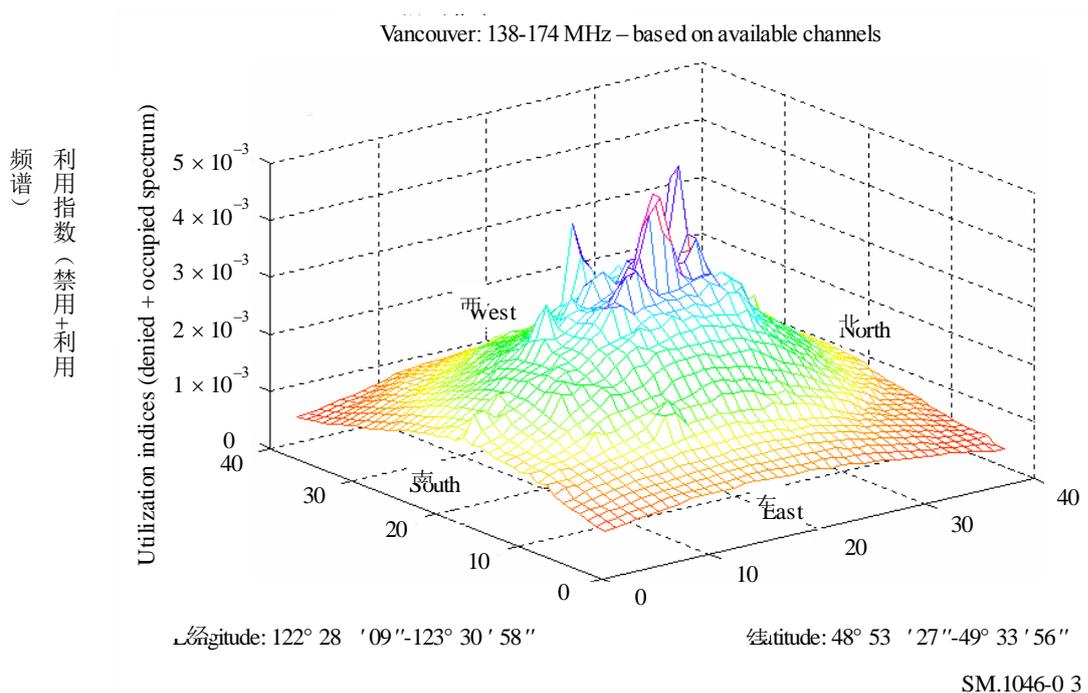
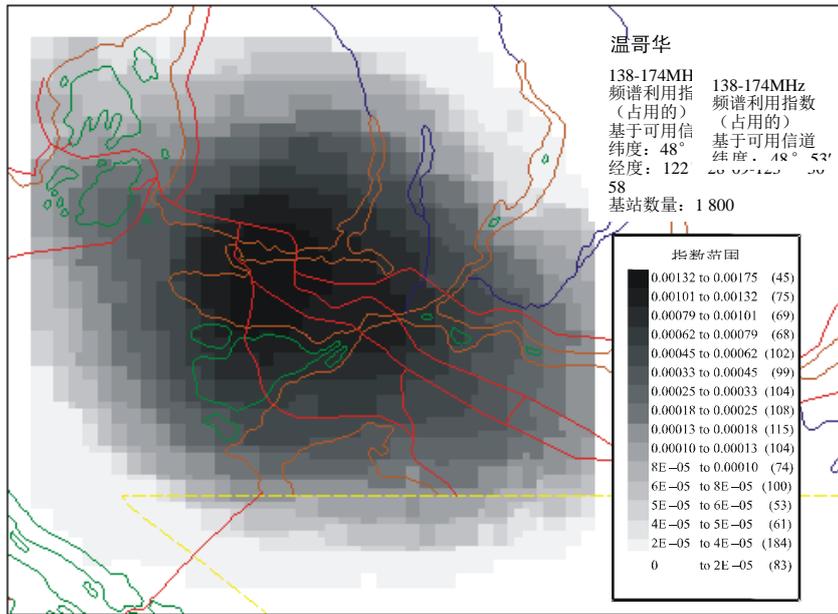


图4

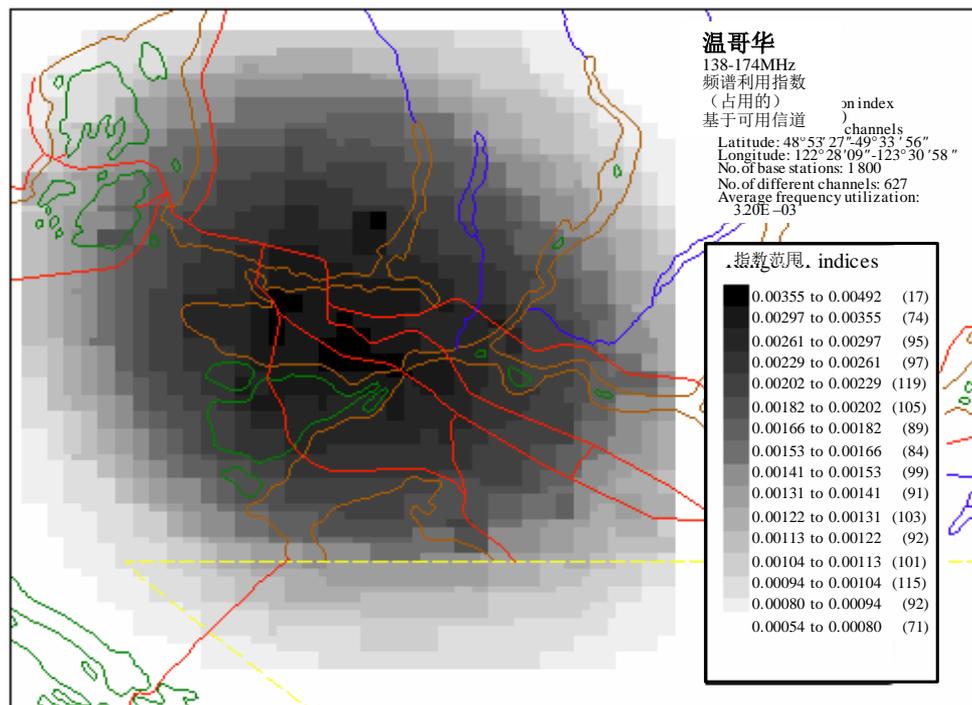
温哥华市占用频谱指数的二维图



1046-04

图5

温哥华市占用及禁用频谱指数的二维图



SM.1046-05

1.4 陆地移动无线电系统的SUE（替代方法）（基于测量的方法）

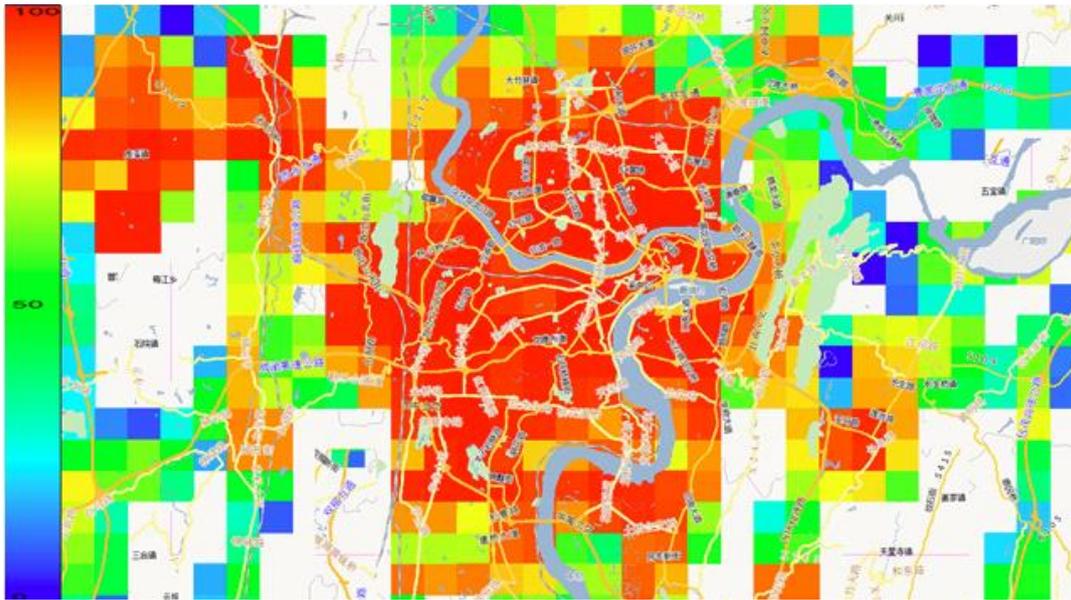
以中国重庆为例，使用附件1中1§ 2所述的测量方法。可通过实际测量到的 B' 、 S' 和 T' 来计算1 860-1 875MHz频段的SUE'。

该频带的实际测量结果 B'/B 如下所示。

图6

重庆市1 860-1 875 MHz实际测量结果 B'/B

测量日期：2016-08-29至2016-09-25



SM.1046-06

该频段 B'/B 的区域统计值为65.58%。

同样，该频段的 S'/S 和 T'/T 区域统计值分别为90.25%和92.13%。

因此，1 860-1 875 MHz频段的SUE'为：

$$SUE_{1860-1875\text{MHz}} = 65.58\% \times 90.25\% \times 92.13\% = 54.53\%$$

1.5 陆地移动无线电系统的SUE（替代方法）

1.5.1 引言

考虑采用某种标准的陆地通信系统的情况，该系统有 J 个工作在一组固定频率上的基站，部署在一定的地理区域内。在一般的情况下，频谱利用效率需要用复杂的参数得到：

$$SUE = \{M, U\} \quad (19)$$

其中：

- M : 在所研究的通信系统的帮助下可以取得的效用；
- U : 该系统的频谱利用因子。

1.5.2 效用的定义

移动通信系统的有用性是由用户在一定地理区域内的任意一点上发送和接收信息的能力所决定的。随着在给定时间内传输的信息量（或在服务区内通信业务量）的增加以及实际可以接入的区域面积的增加，效用也在增加。效用最好用两个量进行表征：在服务区边界内产生的总的业务量 E 以及服务区的相对大小，后者用 $S_r = S_s/S$ 给出，其中 S_s 和 S 分别是所研究系统的服务区和所考虑的地理区域总的面积。效用可以用下面的公式给出：

$$M = E \cdot S_r \quad (20)$$

很明显，对于 S_s 的值远远小于 S （ $S_r \approx 0$ ）的情况，所研究的（移动）系统的有用性将是非常低的。这样的系统所提供的服务与固定通信系统提供的服务相比没有显著的区别。

在服务区 E 边界内产生的总的业务量可以通过移动通信系统的计费子系统确定，计费系统的数据库中有通信起始和结束时间的长期记录。总的服务区面积可以通过计算移动通信系统基站的各个服务区的和得到，或 $S_s = \sum S_j$ ，其中 S_j 是第 j 个基站的服务区面积。

在某些情况下，可能没有计算服务区内所产生业务量所需的数据，或者可能需要了解移动通信系统的潜在能力，此时仍然可以采用（16）式计算出效用，做法是用移动系统的相对用户数量 $N_r = N_a/N$ 来代替表示总的业务量的变量 E ，其中 N_a 和 N 分别是所研究的地理区域内的用户数和总人口数。效用的表达式于是变为：

$$M = N_r \cdot S_r \quad (21)$$

这一指标有一个直观的物理解释。在一定的假定条件下，该结果等于在所研究的地理区域内的任何一个居民、在该区域内的任何一个地点上可以使用该移动通信系统的服务的概率。这也反映了发展移动通信系统的目标：当区域内的所有居民（ $N_a = N$ ）在整个区域（ $S_s = S$ ）都可以接入服务时，这一指标值达到一。在这种情况下，效用达到最大值（ $M = 1$ ）。

1.5.3 频谱利用因子的定义

频谱利用的确定要考虑现有的无线电台对新的电台利用频谱所造成的限制。对于在区域内一个地理位置点 i 处的基站，这种限制可以表示为由于EMC不兼容造成总共 K_i 个频带无法使用，或用比例的形式表示成 $U_i = \frac{K_i}{K}$ ，其中 K 是批准所研究的那类移动通信系统使用的频带的总数。如果（总共 J 个基站当中）一个或多个基站的发射机对与新建基站通信的移动电台的接收机造成不可接受的干扰，或新建基站的发射机对与任何已有基站通信的接收机造成不可接受的干扰，则认为EMC条件没有满足。

确定移动台到基站方向上是否有频谱不可用的条件与此相似。由于限制条件取决于理论上新建基站的位置，因此可能存在多个结果。通过对所研究地域内各部分的限制进行适当的计算，可以简化这些结果。最好的方法是计算加权平均值，加权因子为在每个区域内居住的

人口的比例。通过这种方法，可以认识到在人口稠密的地区的频谱数量也应该大。于是频谱利用因子可以使用下面的公式确定：

$$U = \sum_{i=1}^I \alpha_i U_i \quad (22)$$

其中：

- I : 将地理区域划分成的区域单元的数量；
- $\alpha_i = \frac{n_i}{N}$: 在第*i*个区域单元内的人口占总人口的比例；
- n_i : 居住在第*i*个区域单元内的人口数量；
- U_i : 由于EMC不兼容造成的在第*i*个区域单元中心的基站不可用频带的比例。

1.5.4 频谱利用效率的计算

为了评估使用频率间隔的移动通信系统的频谱利用效率，建议采用下面的步骤：

- 将地理区域分割成边长为1到4公里的单元。
- 确定现有移动通信基站的服务区半径 R_j 。
- 确定每个区域单元*i*的中心到现有基站位置的间隔距离 R_{ij} 。
- 对于每个区域单元，通过比较 R_j 和 R_{ij} 来确定是否处在一个或多个基站的服务区内。
- 通过合并在一个或多个基站的服务区的区域单元，确定所研究的移动通信系统的服务区的大小。
- 通过公式（20）或（21）得到效用指标。
- 确定居住在第*i*个区域单元边界内的人口占总人口的比例 α_i 。
- 确定位于每个（第*i*个）区域单元中心的新建基站的服务区半径。
- 计算移动电台分别与现有的基站和新建基站通信时在接收机输入端得到的信噪比，假定新建基站位于第*i*个单元的中心。
- 确定哪个频带对位于第*i*个单元的中心的是不可用的。
- 对各个区域单元得到的频谱利用的评估结果进行归纳，并使用公式（22）计算频谱利用因子。

1.5.5 频谱设置密度（频谱利用因子计算的另一种方法）

§1.5.1至§1.5.3中描述的SUE计算要求对整个区域进行全面划分，并根据分割网格的数量进行大量计算。作为一种替代方法，本节提出了频谱设置密度（SSD），旨在降低SUE的计算负荷。这种替代方法可用于跨服务区域的基站部署一致的情况。

与将所有区域划分为小网格的想法相比，SSD则是以每平方公里应用多少带宽的方式考虑陆地移动系统中的频谱设置。如果系统应用的频谱带宽很小，则每平方公里的应用带宽将很小。否则，每平方公里的应用带宽将很大，足以承载用户在该地区的流量。这是SSD的基本思想。

为实现SSD，需要考虑两个方面，即载波频谱密度和频谱复用因子。

在不考虑频谱复用的情况下，载波频谱密度（CSD）可视为系统中应用的带宽数量。考虑到这一点，CSD可以计算如下：

$$CSD = \frac{B_{carrier} \times F_{TN}}{N_C \times S} \quad (23)$$

其中：

$B_{carrier}$ 是载波带宽

F_{TN} 是在整个区域内应用的载波的总数

N_C 是陆地移动系统在整个区域的覆盖率，与等式（20）中 S_r 的数值相等

S 是整个区域的面积，同等式（20）。

CSD只考虑每平方公里应用的载波数目。然而，如果采用同频基站互不干扰，陆地移动系统通常会在相邻地区重复使用相同的频带。这就是频谱复用。频谱复用因子可用于定量反映频谱复用的条件。下面的等式显示了计算给定区域的频谱复用因子的方法。

$$M(f_i) = \frac{C_T}{C_i} \quad (24)$$

其中：

C_T 是整个区域的区域单元数

C_i 是整个区域使用 f_i 载波的区域单元数。

注意，需分别计算每个载波的频谱复用因子。在该地区将会使用多个载波，SSD必须考虑频谱复用的整体效果。SSD可以按如下方式计算：

$$SSD = CSD \times \frac{1}{F_{DN}} \times \sum_{i=1}^N \frac{1}{M(f_i)} \quad (25)$$

其中：

SSD 是整个区域的频谱设置密度

CSD 是整个区域的载波频谱密度

F_{DN} 是整个区域使用的不同频率的载波数量

$M(f_i)$ 是整个区域的频谱复用平均因子 f_i 。

以面积为11.44平方公里为例。假设在这个区域实施LTE系统，覆盖率为96.4%。应用了640个载波带宽为20 MHz的载波。CSD 可计算如下：

$$CSD_{e.g.} = \frac{B_{carrier} \times F_{TN}}{N_C \times S} = \frac{20MHz \times 640}{96.4\% \times 11.44km^2} = 1161.86MHz / km^2 \quad (26)$$

使用的载波有两种不同的频率，每个区域单元只被一种载波所覆盖。每个载波的频谱复用系数分别为1.797和2.254。

根据等式（25）则可计算该区域的SSD。其SSD为：

$$SSD_{e.g.} = 1161.86 \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{1.797} + \frac{1}{2.254} \right) = 581.01MHz / km^2 \quad (27)$$

这个区域的总数据吞吐量（总流量）是根据§ 1.5.2所提到的方法观测到，24小时内12 316千兆字节。

因此，SUE在本例中计算如下：

$$SUE_{e.g.} = \frac{12316 \times 8Gbit / 24h / 11.44km^2}{581.01MHz / km^2} = 617.65Mbit / MHz / h / km^2 \quad (28)$$

1.5.6 频谱的利用现状

为预测分配给网络的相应频带的频谱利用状况，我们将单个用户频谱利用现状 λ 作为每一个M网络用户的平均带宽。

一般情况下，假设网络中有N个频段。当所有频率都在所有地理区域一直工作时，每一个M网络用户的平均带宽可以按此公式计算：

$$\lambda = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} B_i}{M} \quad (29)$$

其中， B_i 是载波 i 的带宽。

在部署网络时，可以在某些地理区域、场景和时间中部署一些频率范围，因为我们可以消除不同系统之间的干扰并动态共享频谱。考虑到这一点， λ 的公式定义如下：

$$\lambda = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} B_i \times \frac{\prod_{pmt,i}}{\prod_{max,i}} \times \frac{T_{pmt,i}}{T_{max,i}} \times \mathcal{G}}{M} \quad (30)$$

其中, $\Pi_{pmt,i}$ 是允许载波*i*工作的网络区域的面积, $\Pi_{max,i}$ 是允许载波*i*工作的网络区域的最大区域(通常为网络区域的总面积)。 $T_{pmt,i}$ 是允许载波*i*单日内工作的时长, $T_{max,i}$ 是允许载波*i*单日内工作的最大时长(通常为24小时)。 ϑ 是一些其他因素(如情景)引入的影响因子, 其值在0和1之间。例如, 如果载波只允许在室内工作, 则可根据网络用户分布反映由限制引入的单个用户带宽的减少。

基于特定场景下平均带宽的定义, 我们可以将频谱利用情况定义为单用户频谱利用状况、基于地理归一化的单用户频谱利用状况和基于人口归一化的单用户频谱利用状况。

考虑到实际使用区域, 基于地理归一化的单用户频谱利用状况的计算公式如下:

$$\xi = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} B_i \times \frac{\Pi_{pmt,i}}{\Pi_{max,i}} \times \frac{T_{pmt,i}}{T_{max,i}} \times \vartheta}{\sum_{i=0}^N \left(\frac{\Pi_{act,i}}{\Pi_{pmt,i}} \times M \right) / N} \quad (31)$$

其中, $\Pi_{act,i}$ 是实际的使用面积。如果实际使用区域与允许使用区域相同, 则基于地理归一化的单用户频谱利用状况将等于单用户频谱利用状况。

特别是有些地区是允许使用的地区, 但该地区却没有覆盖价值, 如戈壁滩、沙漠等。

这些地区将减少单个用户的地理归一化带宽的参考值。因此, 我们使用区域内的人口代替区域, 定义了基于人口归一化的单用户频谱利用状况的计算公式:

$$\psi = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} B_i \times \frac{\Pi_{pmt,i}}{\Pi_{max,i}} \times \frac{T_{pmt,i}}{T_{max,i}} \times \vartheta}{\sum_{i=0}^N \left(\frac{\Gamma_{act,i}}{\Gamma_{pmt,i}} \times M \right) / N} \quad (32)$$

其中, $\Gamma_{act,i}$ 是载波*i*实际使用区域的人口, $\Gamma_{pmt,i}$ 是载波*i*允许使用区域的人口。同样, 如果实际使用区域与允许使用区域相同, 则基于人口归一化的单用户频谱利用状况等于单用户频谱利用状况。

2 无线电中继系统的频谱使用

2.1 引言

对于连续工作的无线电中继系统, 可以不考虑时间因素。参照公式(2), SUE可以写作:

$$SUE = \frac{C}{B \cdot S_\alpha} \quad (33)$$

其中:

C : 通信容量的度量, 例如电话信道或bit/s。

S_{α} : 几何测量, 例如, 区域, 或在一个节点的分支链路的角度。

2.2 在节点处的带分支链路的长干线的SUE

归一化的通信容量给出了地面点对点的无线电中继系统的SUE, 其定义为:

$$SUE = \frac{N \cdot A}{B_c} \quad (34)$$

其中:

N : 一个中继站允许的分支链路(即, 双向无线电路由)的数量

A : 每无线电信道的发射容量(例如, 电话信道数量)

B_c : 每个无线电信道要求的RF带宽。

这个公式包括了几何量度 N (N 取决于分支链路间的允许角度)。

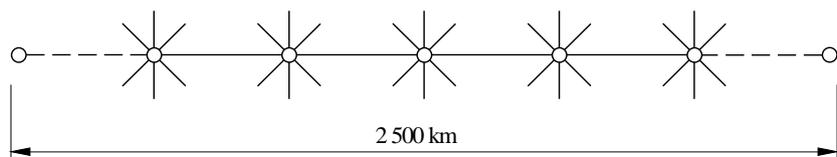
地面陆地点对点无线电中继系统中的频谱使用效率是使用上式对传输电话的情况计算的。

使用的假设是:

- 传输的是电话信号;
- 衰落的概率同ITU-R P.530建议书中给出的相同;
- 电路长度是2 500 km; 电路模式如图7所示;

图7

电路模式



SM.1046-07

- 要求的载噪比 C/N , 表示为:

$$C/N = 10 \log [(2^n - 1) / 3] + 11.8 \quad \text{dB} \quad (35)$$

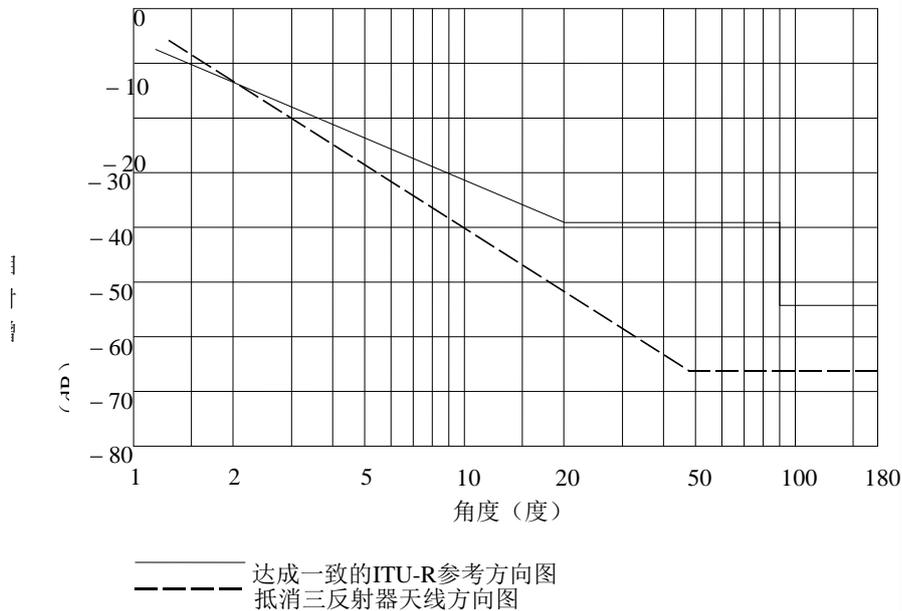
其中 n 是 n 相QAM;

- 2500 km无线电中继电路的噪声的十分之一分配给来自其他路由的干扰噪声;
- 来自其他路由的干扰与有用信号的频率相同;
- 使用了如图7所示的在ITU-R F.699建议书中的圆天线的参考天线方向图和在日本数字微波中使用的双偏移三反射面天线;

— 链路的分支角度是随机的。

图8

天线方向图



SM104680

对这两种类型的天线的归一化通信容量进行了计算并示于图8中。ITU-R F.699建议书中圆天线的性能不足以用来估计高阶调制系统的频谱使用效率。由于结果依赖于天线性能，如果使用高性能天线，那么像256-QAM的高阶调制是有效的。

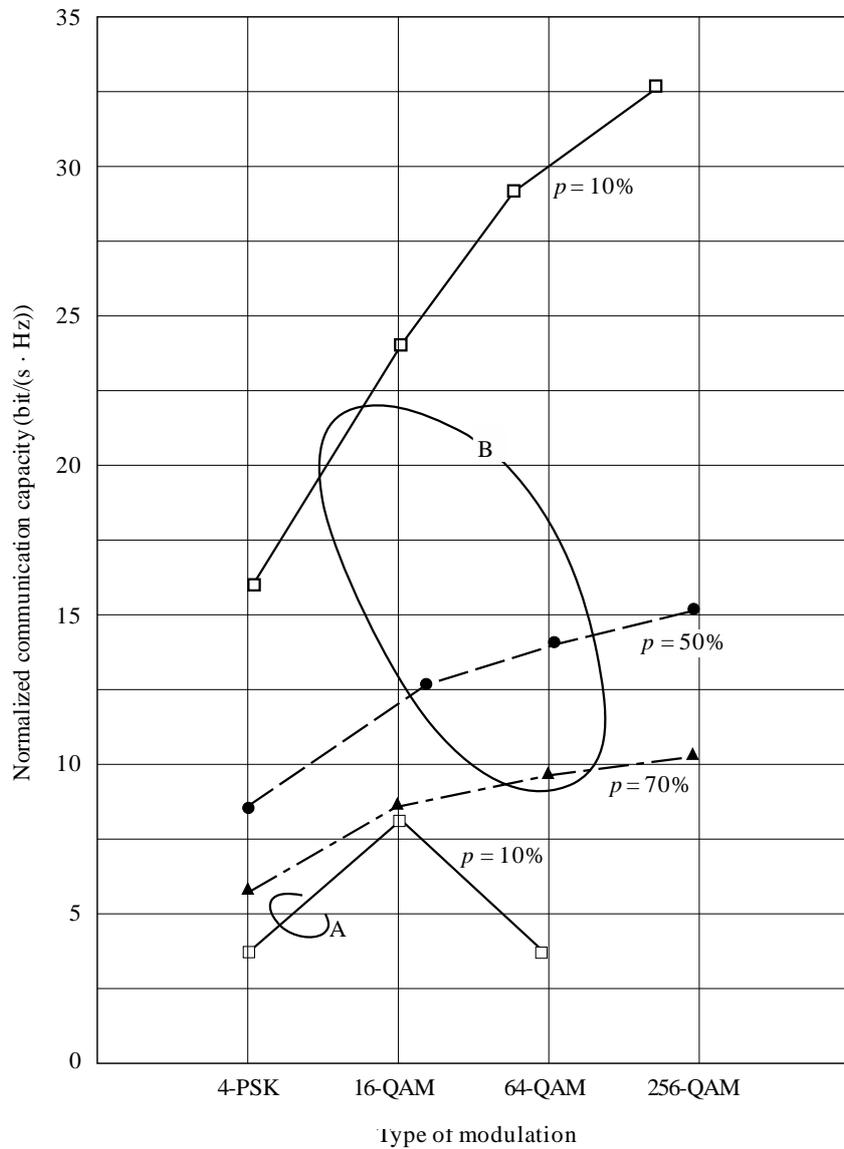
2.3 在随机排列的无线电中继链路中的SUE

2.3.1 公式

图10表示了一个无线电中继链路X-Y和另一个无线电台站Z工作在相同的频率上。台站Z随机地位于环绕台站Y的圆周上的任意位置。

台站Y接收一个来自台站X的频率为 f_1 的所需信号。台站Z在任意一个方向发射一个同样频率 f_1 的信号。

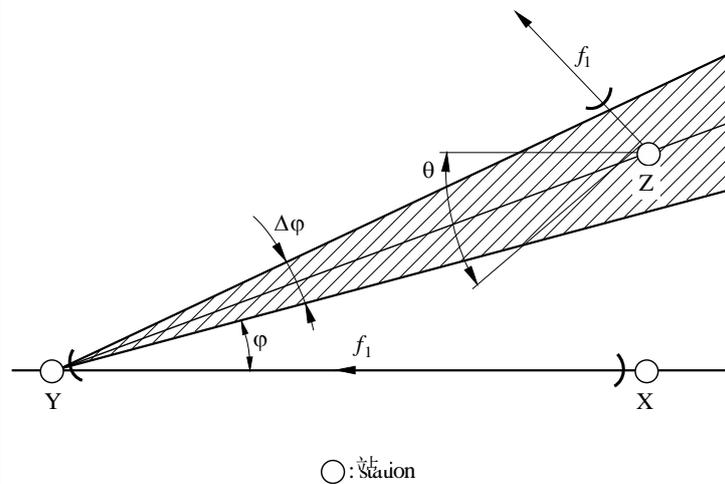
图9
标准化的通信能力



衰落余量: 0 dB □
 20 dB □
 Channel capacity: 64 kbit/s
 Allotment to branch noise: 100%
 P: 干扰可能性 reference
 ●: 参考模式 reference pattern
 B: 偏移三反射器天线图案

图10

站点随机布局图



SM.1046-10

归一化的通信容量给出频谱利用效率，其定义为：

$$SUE = \frac{N \cdot A}{B_c} = \frac{\bar{p}}{p} \frac{A}{B_c} \quad (36)$$

其中：

N ：可能使用相同频率的无线电链路数量： $N \approx \bar{p}/p$

A ：每个无线电信道的发射容量。

台站Y接收到的干扰超过可接受的限度的概率 p 必须结合台站Y和Z的天线方向图来计算， \bar{p} 是最大允许干扰概率。

因为忽略了来自两个或更多台站的干扰的叠加，在实际应用中应提供一些余量。

2.3.2 应用：2 GHz频带无线电中继系统的频谱效率

使用以上公式计算一个2 GHz频带小容量地面点对点无线电中继系统在传输电话时的SUE。

对于1.8 m直径天线的相对频谱利用效率，使用表2中每种调制类型允许的干扰比和效率来计算。结果见图10。

对较小的衰落余量，数字系统优于模拟系统。在这个研究中，由于衰落引起的衰减同由于干扰引起的 W/U （有用信号电平与无用信号电平比）的恶化相同。如果使用空间分隔技术，则所需的衰落余量较低。一般来讲，数字系统能带来较高的频谱利用效率。

对数字调制，将两相调制变为多相或多态调制的需要较少的带宽，但是在干扰较大时它可能有较低的频谱利用率。精确的值取决于天线特性等，但是当其他无线电链路围绕中继站周围在一个区域内任意分布时，从宏观的角度看4-PSK系统可能是最佳的。

表2
在2 GHz频带各种调制类型的参数

调制类型		允话的S/N 或误差率	干扰减少因子 (IRF)		允许的有用信号与 无用信号之比W/U	与B相关的参数		相邻信道 间隔B	信道 数量A	A/B ⁽¹⁾ (信道/kHz)
模拟传输	MF	58 dB	20 dB		38 dB	测试音的频偏: 100 kHz r.m.s.		520 kHz	24	0.046
	SSB	58 dB	9.5 dB		48.5 dB	最高基带频率: 108 kHz 滤波器系数: ×2 频率容量: 20 kHz		236 kHz	24	0.1
数字传输	2-PSK	10 ⁻⁶	(C/N)	(恶化)	16.2 dB	时钟频率	滤波器系数	2 MHz	24	0.012
			10.7 dB	5.5 dB		1 544 kHz	× 1.3			
	4-PSK	10 ⁻⁶	13.7 dB	5.5 dB	19.2 dB	772 kHz	× 1.4	1.1 MHz	24	0.022
	8-PSK	10 ⁻⁶	19.1 dB	5.5 dB	24.6 dB	515 kHz	× 1.5	0.77 MHz	24	0.031
	QPRS	10 ⁻⁶	16.8 dB	5.5 dB	22.3 dB	722 kHz	× 1.1	0.85 MHz	24	0.028
16-QAM	10 ⁻⁶	21.4 dB	5.5 dB	26.9 dB	386 kHz	× 1.6	0.62 MHz	24	0.039	

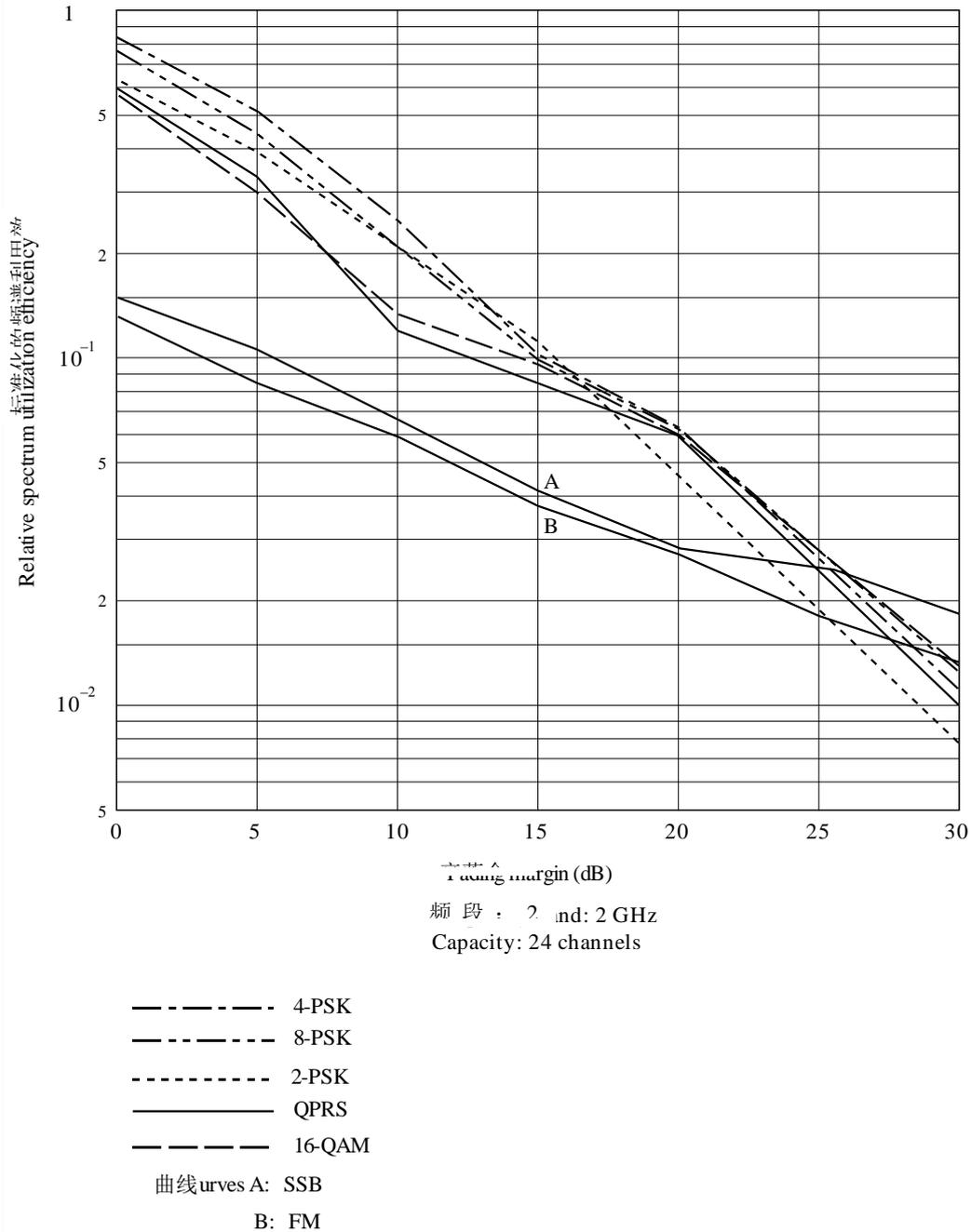
(1) 每种类型调制的合适的效率。

QPRS: 正交部分响应系统。

使用的假设是:

- 每种调制类型的可接受的干扰和频谱效率见表1。总电路噪声的80%分配给干扰;
- 受到干扰的台站 (Y) 与干扰台站的距离假设相同: 认为该假设引起的效率计算上的误差很小, 因为两个链路的自由空间损耗即使它们在长度上相差一倍, 也仅有6 dB的差;
- 有用信号和干扰信号的衰落假设没有相关性;
- 天线辐射方向图是ITU-R F.699建议书中的参考图;
- 所有台站有相同的发射输出功率;
- 干扰概率的限制, $\bar{p} = 0.1$ 。

图11
随机布局时的SUE



SM.1046-11

2.3.3 在随机网格状网络中的SUE

为了公平地比较调制技术，可以假设一个交错频率规划，它的信道间隔对应于邻道干扰引起的性能恶化。表3给出一个在原CCIR报告608（1978年，京都）中定义的归一化信道间隔的试验值X，和相应的频谱效率(bit/(s·Hz))。即使基于其他的假设能得到不同的结果，也应注意到表3的计算结果与从特定信道安排，如ITU-R所建议，得到的值很接近（例如140

Mbit/s, 16-QAM调制和交叉极化信道间40 MHz的信道间隔)。测量值可能与这些计算值有差别。

表3

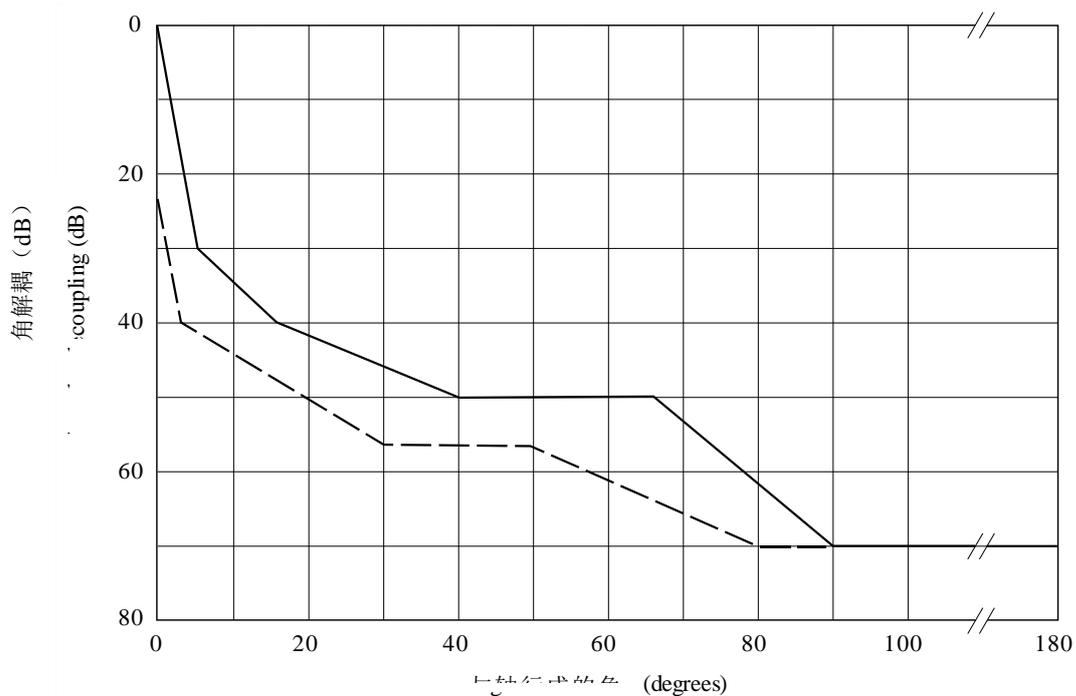
调制方法	归一化信道间隔, X	频谱效率 (bit/(s·Hz))
4-PSK	1.88	2.13
8-PSK	2.16	2.77
16-QAM	2.23	3.59

注1

- 由于相邻信道干扰引起的恶化: 0.5 dB。
- 信道滤波器: 升余弦, 滚降系数为0.5。
- 交叉极化信道间去耦合 (残余交叉极化鉴别 (XPD)): 12 dB。

在分析中使用的天线辐射图见图11; 它是一个典型的抛物面天线。假设来自其他链路的同信道干扰的性能恶化 (一个比特错误率 (BER) 1×10^{-3}) 不大于1 dB。假设受到干扰的链路以40 dB衰落余量处在门限处, 而干扰链路接收它的标称值。

图12
天线辐射掩膜



抛物面天线parabolic antenna, $D/\lambda = 75$

- 共极化
- - - - cross-polarization

归一化的网络密度 γ 定义为:

$$\gamma = \frac{2N \rho^2}{\text{网络覆盖的总面积}} \quad (37)$$

其中:

- N : 网络中的无线电节点数量
- ρ : 跨度长的均方值。

图13结果表明在高密度网络中, 4-PSK调制能产生最高的效率。可是, 当网络密度很低时, 调制方法趋向于使用8-PSK或甚至16-QAM。这表明调制方法SUE取决于干扰环境。

图13
网状网络的频谱效率

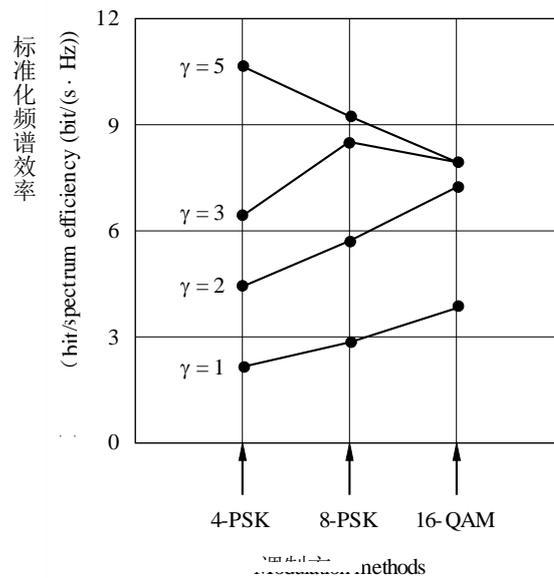


图1、2的天线辐射效率 of Fig. 1 2.
辐射效率的降低是由于频率重用: 1 dB

SM.1046-1 3

注1 – 其他资料见:

DODO, J., KUREMATSU, H. and NAKAZAWA, I. [8-12 June, 1980] Spectrum use efficiency and small capacity digital radio-relay system in the 2 GHz band. IEEE International Conference on Communications (ICC '80), Seattle, WA, United States of America.

TILLOTSON, L. C. *et al.* [1973] Efficient use of the radio spectrum and bandwidth expansion. *Proc. IEEE*, 61, 4.

2.4 评估数字无线电中继系统新技术的频谱节约特性

2.4.1 引言

为了评估不同设计参数或技术选择的频谱节约特性，设计了一个计算机模型。获得的相对SUE必须定量的分析。SUE概念可以延伸和定义为：

$$SUE=VC/(T \cdot A \cdot B) \quad (38)$$

其中：

- VC : 话音信道数量
- T : 系统使用的时间部分（在此分析中定义等于1）
- A : 禁用面积（ km^2 ）
- B : 占用带宽（MHz）。

选择公式（24）是因为它在评估一个系统的频谱节约特性时，考虑了的禁用的频谱和空间（面积）两个因素。禁用面积是指如果不将系统的性能降低到规定的性能准以下，该系统就不能工作的区域。禁用面积是系统天线图特性、发射机输出功率和接收机干扰门限电平的函数。

计算禁用面积的算法包括了将发射机天线增益图分割（量化）成多个部分，三角状的扇区，这些扇区精确地表示了天线的方向性图。发射机天线增益图是模型的输入参数，模型通过对每个部分求和来计算禁用面积。几何学上，每个部分是一个三角状的扇区，其面积可以使用下式计算。

$$\text{三角扇区面积}=\pi R^2\theta / 360 \quad (39)$$

其中：

- R : 扇区半径（ R_1, R_2, \dots, R_n ）
- θ : 扇区中心角（ $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ ）
- n : 三角扇区的数量。

半径 R_n 的计算使用下面的关系计算：

$$L(R)=P_t+G_i(n)+G_r-I_{max} \quad (40)$$

其中：

- $L(R)$: 所需的传播损耗（dB）
- P_t : 发射机输出功率（dBm）
- $G_i(n)$: 扇区 n 的发射机天线增益（dBi）
- G_r : 接收机天线增益-10 dBi
- I_{max} : 最大允许的干扰电平（dBm）。

接着使用一个光滑球面的倒数传播模型，可以确定相应于所需损耗的距离 R ，以便评估每个三角扇区的禁用面积（见公式（25））。

在点对点无线电中继系统中应用公式(24)时,有必要建立两个微波站址之间的一个参考系统的特性。这些特性包括路径长度、路径衰减、天线增益、插入损耗、衰落余量和系统增益。也需要建立所研究的调制类型的调制特性。在此研究中考虑的数字调制是16-QAM、64-QAM和256-QAM。在此分析中的数字无线电中继系统假设的特性是以北美标准为基础的,它们包括:

数字无线电中继系统参数(见注1)

- 话音信道:
 - 1 344对于16-QAM
 - 2 016对于64-QAM
 - 2 688对于256-QAM
- 比特率:
 - 90 Mbit/s对于16-QAM
 - 135 Mbit/s对于64-QAM
 - 180 Mbit/s对于256-QAM
- BER: 1×10^{-6}
- 接收机噪声系数 F : 4 dB
- 系统增益 G_s : 103 dB。

分析中使用了理论传输效率和不同调制类型的输入载波—噪声比(C/N)_i电平,以便公平地进行比较。

以下讨论了在天线、调制类型和信号处理的主要设计领域应用公式(24)的问题。

注1—在此分析中使用的系统参数,显示了不同情况下的频谱效率的单一路径分析。正是如此,这些参数不能代替可实现系统,特别是代替那些使用高阶调制的系统。因此结果说明了频谱效率的概念在无线电中继系统中的应用,主管部门应在分析频谱效率中使用有代表性的参数。

2.4.2 天线

禁用空间是说明频谱节约的一个关键因素。对禁用空间起作用的一个主要无线电通信系统部件是它的天线。在最近几年,在天线设计领域的极化鉴别和旁瓣抑制上的取得了显著的进展,为点对点微波无线电通信提供了提高频谱效率的能力。

通过在天线设计中使用频谱节约技术可以实现频率复用。如果将旁瓣电平降到最低,那么就能实现禁用空间的最小化。天线辐射图以及旁瓣分布随着天线类型变化。通常在点到点微波传输中使用的三种天线类型是:

- 标准抛物面(STD)
- 遮蔽抛物面(SHD)
- 圆锥喇叭反射器(CHR)。

天线增益为43 dBi的典型的辐射图见图13。模型中使用了图13中所示的天线方向图特性。

图14中显示的是三种类型天线的发射机输出功率对应的禁用面积图,接收机干扰门限取-102.5 dBm。虽然所有天线的主波束增益是相同的,图14中显示的结果显示CHR天线比其他两种天线的禁用面积小。同时,在发射机功率大于30 dBm时,三种天线的禁用面积相差很小。这是可以理解的,旁瓣/后瓣天线特性对禁用面积的作用很小,除非发射机的功率增加

到30 dBm以上。当发射机功率大于30 dBm时，三种天线禁用面积的差才比较明显。禁用面积也是接收机干扰门限的函数。

图14

STD、SHD和CHR天线典型辐射图

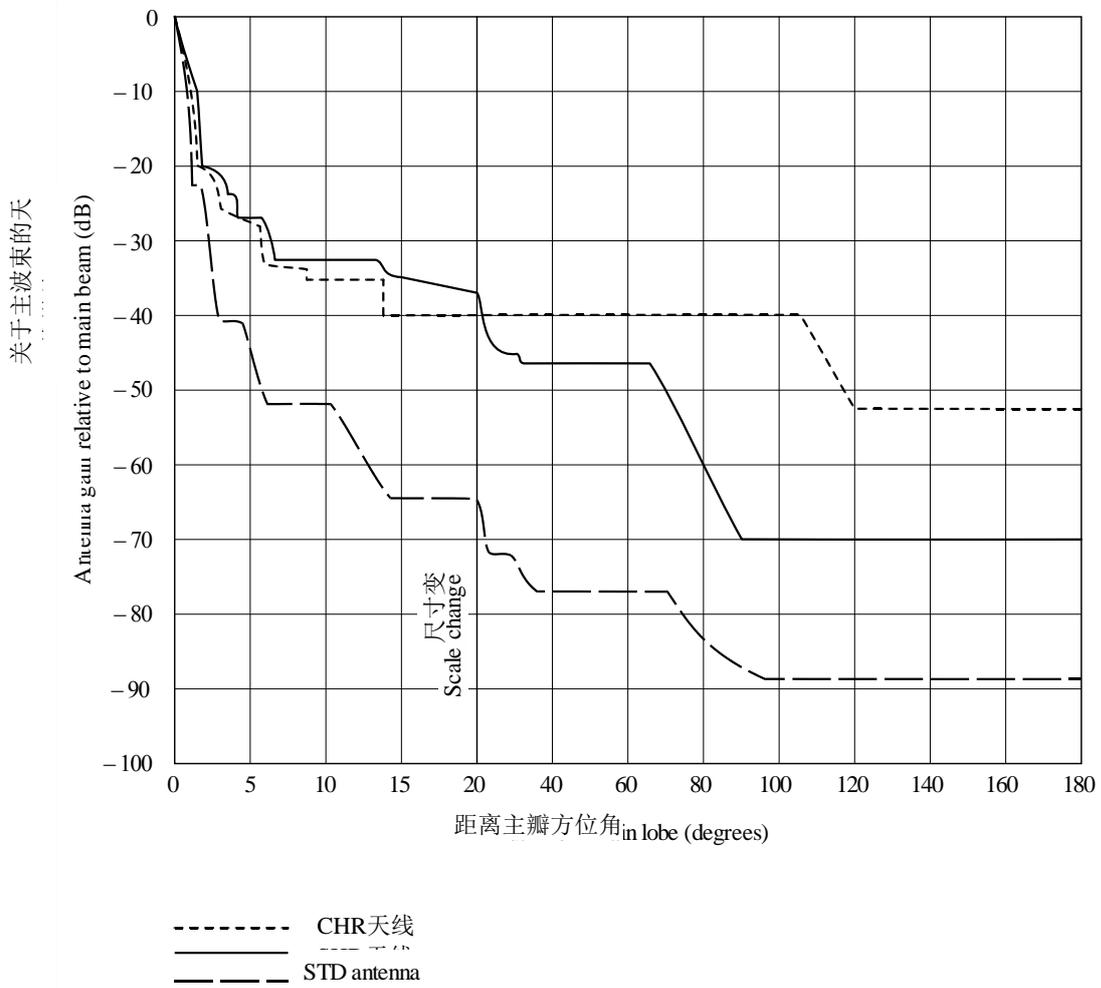
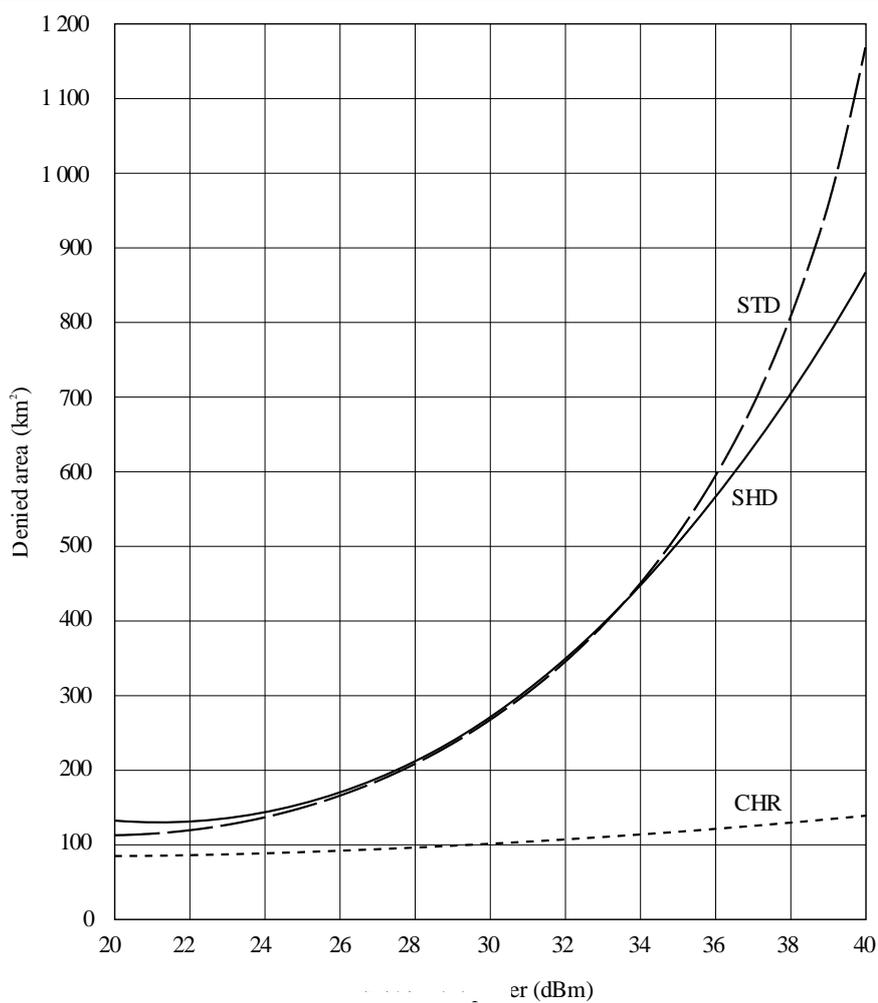


图15
作为天线类型和发射机输出功率函数的禁用区域



基于距离平敷地球球形50米的发射机和 antenna heights of 50 m over smooth earth terrain

- $I_{max} = -102.5$ dBm
- $G_r(\text{direction}) = 43$ dBi
- $G_r = -10$ dBi

SM.1046-1 5

因为三个天线的禁用区是 P_t 和 I_{max} 的函数，三个天线的频谱节约特性必须与系统调制类型联系起来。因此STD、SHD、CHR天线的频谱效率加强特性将在调制部分讨论。

2.4.3 调制

不同调制类型的频谱节约特性的评估很复杂，因为禁用频谱和禁用空间受系统使用的调制类型的影响。一般来讲，系统的参数，如占用带宽、要求的接收机输入端载噪比 $(C/N)_i$ 和 I_{max} 都是调制类型的函数，与频谱的利用直接相关。

这个分析是以理论上的传输效率和接收机对不同调制类型的 $(C/N)_i$ 为基础的，保证公平地进行比较。为了评估不同调制类型的频谱节约特性，需确定每种情况下地占用带宽 B 和所

要求的 P_t 。这些参数在表4中给出。

表4
数字系统参数

调制类型	发射效率 (bit/(s·Hz))	占用带宽 B (MHz)	所要求的输入 载噪比 $(C/N)_i$ (dB)	噪声电平 (dBm)	最小载波电平 (dBm)	发射机输出 功率电平 P_t (dBm)
16-QAM	4	22.5	21.0	-96.5	-75.5	27.5
64-QAM	6	22.5	27.0	-96.5	-69.5	33.5
256-QAM	8	22.5	33.0	-96.5	-63.4	39.5

数字调制的占用带宽 B 用如下关系确定：

$$B \text{ (MHz)} = \text{比特率(Mbit/s)/发射效率(bit/(s·Hz))} \quad (41)$$

其中比特率（见数字系统参数）和发射效率（见表4）是调制类型的函数。

为了建立每个调制类型所需的 P_t ，需确定特定性能准则所需要的接收机 $(C/N)_i$ 。使用 1×10^{-6} 误码率作为性能准则，可以从文献上得到理论上需要的 $(C/N)_i$ 。

在表4中给出的接收机噪声输入电平 N_i (-96.5 dBm)是根据接收机带宽为22.5 MHz，接收机噪声系数为4 dB得到的。接收机输入端要求的最小载波电平 (C_{min}) 由以下关系确定：

$$C_{min} \text{ (dBm)} = (C/N)_i + N_i \quad (42)$$

表4给出的所需的发射机功率电平， P_t ，是使用以下公式获得的：

$$P_t \text{ (dBm)} = C_{min} + G_s \quad (43)$$

其中 G_s 代表系统增益，设为103 dB。

禁用面积也是受害接收机的 I_{max} 的函数。确定与每个调制有关的接收机的 I_{max} 时，假设受害接收机与干扰发射机的调制类型一致。在这个分析中， I_{max} 的确定使用了电信产业协会（TIA）电信系统公告第10-E号中的建立的准则。对数字系统，性能准则是当误码率从 1×10^{-6} 上升到 1×10^{-5} ，相应于接收机噪声电平增加近1 dB。这等效于接收机输入端干扰对噪声比 $(I/N)_i = -6$ dB（例如对16-QAM，64-QAM和256-QAM， $I_{max} = -96.5 \text{ dBm} - 6 \text{ dB} = -102.5 \text{ dBm}$ ）。

表5包括了使用表4中的带宽和发射机输出功率以及 $I_{max} = -102.5 \text{ dBm}$ 计算得到的SUE值。表5中的SUE的项是针对三种不同调制类型和三种天线的。从频谱利用的角度看，有较高SUE值的系统更有效。应该强调的是计算结果清楚地表明SUE随着天线类型出现明显的变化。例如，对于64-QAM，TD天线的SUE是0.201，而对于SHD和CHR分别为0.212和0.811。因此，表5中所示的结果清楚地表明仅当同时考虑了天线和调制效果的情况下才能实现SUE的优化。

表5
频谱利用效率

阶数	不同天线类型的SUE		
	STD	SHD	CHR
1	16-QAM (0.307)	16-QAM (0.282)	256-QAM (0.841)
2	64-QAM (0.201)	64-QAM (0.212)	64-QAM (0.811)
3	256-QAM (0.112)	256-QAM (0.144)	16-QAM (0.709)

分析结果也显示对于STD和SHD天线，64-QAM的SUE比256-QAM的高，但对CHR则不是这样。表6帮助解释为什么对于超高性能的SHD天线，64-QAM比256-QAM的频谱效率更高。模型中的输入参数在表中提供。VCs的数量对64-QAM是2016，对256-QAM是2688。需要的系统带宽 B ，对64-QAM和256-QAM ($B=22.5$ MHz) 是相同的。但是，256-QAM所需的 P_t 明显高于64-QAM的 (39.6 dBm对33.5 dBm)。因为发射机功率对另外用户的禁用面积起主要作用 (见图14)，256-QAM的禁用面积明显高于64-QAM调制的，因此引起64-QAM调制比256-QAM的调制的频谱效率更高。

表6
对于SHD天线64-QAM和256-QAM SUE的比较

参数	64-QAM	256-QAM
VC	2 016	2 688
B (MHz) (见表4)	22.5	22.5
P_t (dBm) (见表4)	33.5	39.5
I_{max} (dBm)	-102.5	-102.5
A (km ²) (见图11)	421	830
SUE (见表5)	0.212	0.144

可是，系统频谱保留潜力是多个设计因素的函数，在评估系统频谱效率时都需要考虑。也就是说，不能在没有考虑所有其他设计因素 (例如天线、信号处理、RF滤波器等) 的情况下，说一种特定调制的系统比另一种调制保留更多的频谱。

表5可以用来确定与使用STD天线相比，使用SHD天线或CHR天线时在频谱保留方面的相对改进。正如前面提到的，改进SHD和CHR天线的频谱保留特性取决于调制类型。这是因为由特定天线类型产生的禁用面积是 P_t 的函数，而后者依赖于调制 (见图14)。表7使用了表5中SUE数据，用来表示所研究的不同调制的SUE改进的百分数。对数字调制，最大的改进为在256-QAM调制的条件下，SHD和CHR天线对应的改进值分别为28%和533%。

表7

SHD和CHR天线对应的SUE的改进是调制的函数

调制类型	SUE改进	
	SHD天线	CHR天线
16-QAM	-8%	130%
64-QAM	6%	338%
256-QAM	28%	533%

2.4.4 信号处理

在固定无线电中继系统中，信号处理是在发射机和接收机终端进行。信号处理由为了产生某些需要的特性的一个信号电子操作组成。信号处理可以影响以下参数如振幅、频率、相位、信号电平和可靠性。信号处理技术的使用可以改进一个系统的处理增益，它允许对特定接收机输出性能准则降低功率 P_t 。因此，通过使用信号处理技术，可以降低 P_t 以减少对其他系统的禁用空间（区域）。可是，应该注意到信号处理技术是由微波链路设计者用来改进链路可靠性的，而通常不是被考虑用于频谱保留的目的。

2.4.5 错误校正/编码

前向纠错（FEC）编码是改进数字微波系统BER性能的一种方法，特别是当系统的功率被限制时。使用FEC编码技术允许对错误限制一个数，在电路两端安装特殊编码和软件（或硬件）在接收机端进行校正。这个BER的改进是以满足特定BER性能所需要的接收机 $(C/N)_i$ 的减少为代价的，因此减小了对其他系统的禁用区。 $(C/N)_i$ 的减少作为编码增益的参考。编码技术的性能由编码增益和编码速率描述。可是，编码速率对系统占用带宽有影响，因此增加了对频谱其他用户的禁用频谱。

为了显示频谱保留的编码效果，选择64-QAM作为研究的调制类型。选择四种类型FEC码。表8显示了编码率，带宽扩大因子（1/编码率），编码后占用带宽，对BER为 1×10^{-6} 的可得到的 $(C/N)_i$ 的减少和考虑到可得到的 $(C/N)_i$ 减少后需要的 P_t 。在表8显示的带宽和功率的值，输入到SUE模式中作为一种频谱保留技术来评估编码。表9显示STD、SHD、CHR天线的SUE。在表9中显示没有编码的64-QAM的SUE作为有和没有编码比较的基线。

表8

错误校正/编码 (64-QAM调制)

信号处理	编码速率	带宽扩展因子	占用带宽 B (MHz)	C/N 减少 (dB)	发射机输出 功率 P_t (dBm)
错误校正/编码	1/2	2	45.00	6.0	27.5
	3/4	1.333	30.00	3.5	30.0
	7/8	1.142	25.70	2.0	31.5
	18/19	1.055	23.74	3.0	30.5

总之，在表9中给出的SUE值显示，当使用了高效率的编码技术（如高的编码率和高的编码增益的编码技术）时，信号处理技术如使用RF带宽平衡 C/N 的错误校正/编码技术，仅在频谱保留和较高的SUE值上提供有效的改进。而且，当系统有STD天线而不是SHD或CHR天线时，频谱保留相对改进较大。这是由于STD天线因为较高的旁瓣/后瓣特性禁用区的减少较大。

表9

错误校正/编码的SUE (64-QAM调制)

信号处理类型		不同天线类型的SUE		
		STD	SHD	CHR
没有信号处理		0.201	0.212	0.811
错误校正/编码	编码率			
	1/2	0.230	0.211	0.532
	3/4	0.249	0.240	0.673
	7/8	0.235	0.237	0.754
	18/19	0.294	0.285	0.838

2.4.6 适配/横向均衡器

适配/横向均衡器在多径衰落、线性失真或两者都有时可改进了数字系统的性能。均衡器仅能缓解多径衰落的分散。这些适配器对脉冲重新整形以减少内部符号干扰。在64-QAM接收机中使用这些均衡器可以使混合衰落余量大致改进4~6 dB。适配均衡器主要的缺点是它们的花费。这个模型用在系统带宽为22.5 MHz和 P_t 为29.5 dBm（64-QAM的 P_t 有4 dB的减少）时。表10显示三种类型天线的SUE。没有适配均衡器的SUE在表中显示用于与有适配均衡器的比较。

表10

适配均衡器的SUE的改进（64-QAM调制）

信号处理类型	不同天线类型的SUE		
	STD	SHD	CHR
没有信号处理	0.201	0.212	0.811
带适配均衡器	0.355	0.337	0.930

对64-QAM，使用适配均衡器可以使系统频谱保留特性的改进将近达到15%到75%，使用STD天线时得到最大的改进。

2.4.7 错误校正/编码和适配均衡器

一些数字系统使用错误校正/编码和适配均衡器来改进系统的性能。对64-QAM，利用错误校正/编码（18/19编码率）和适配均衡器可以减少所需的 $(C/N)_i$ ，对 $BER = 1 \times 10^{-6}$ 减少7 dB。对占用带宽23.74 MHz和 P_i 26.5 dBm的SUE模式的应用在表1中显示（对64-QAM P_i 减少7 dB）。表11表明使用错误校正/编码和适配均衡器可以使系统频谱保留特性的改进从30%到150%，使用抛物面天线时系统有最大的改进。

表11

错误校正/编码和适配均衡器的SUE（64-QAM调制）

信号处理类型	不同天线类型的SUE		
	STD	SHD	CHR
没有信号处理	0.201	0.212	0.811
错误校正/编码和均衡器	0.503	0.441	1.066

2.4.8 小结

2.4.8.1 系统频谱保留潜力是几个设计因子的一个函数，所有这些当评估系统SUE时必须考虑。也就是，人们不能说一个特定调制的系统比没有考虑所有设计因子如天线、信号处理、RF滤波器等的另一个调制的系统有更大的频谱保留。

2.4.8.2 较高阶的数字调制（有较高传输效率， $\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ ）要求较高的 P_i 电平。因此，当参考了禁用区使用频谱利用和效率的定义时，传输效率较高的调制频谱不一定保留得更多。因此，数字调制的传输效率不足以显示频谱效率。

注1 — 其他资料见：

HINKLE, R.L. and FARRAR, A.A., [May 1989] “pectrum-conservation techniques for fixed microwave systems”. NTIA Report TR-89-243. National Telecommunication and Information Administration. US Dept. of Commerce, United States of America.

2.5 单跳农村无线电中继的RSE

使用不同类型调制的单跳农村点对多点无线电中继、系统的RSE值与MTES（见附件1，§3和公式（4））比较。

在这样一个网络采用的模式中，每个中心站有一个特定的业务区，在其中它通过位于不同农村站址的四个本地站的单链路通信。

在这样一个网络的与MTES有关的RES被认为是以下大量参数的函数：使用的频带、频率类型和网络的极化空间规划、天线安装高度、不同类型和调制参数（FM和多-PSK脉冲码调制（PCM））的天线直径。

表12代表是这些计算的一些结果，网络工作在8 GHz频带，天线高度45m，天线直径D为1.5和3.0m，2-4个频率工作（分别为K=2和K=4），和两种极化规划—在网络中使用一种（1P）和两种（2P）类型极化下。PCM给出对2-PSK(M=2)，4 PSK(M=4)和保证RSE最大值(M_{max})的数据。表12中的直线表示给定混合参数不能满足性能特性标准。如在表2显示的，使用带PSK的PCM仅在最佳调制条件($M_{max} \geq 8$)下并且天线直径为3m时在RSE产生增益。

注1 – 其他资料见：662-3号报告的附件IV（1990年，杜塞尔多夫）。

表12

单跳农村无线电中继链路的RSE

调制	频率规划	调制参数	RSE			
			D = 1.5 m		D = 3.0 m	
			1P	2P	1P	2P
FM	K = 2		0.27	0.3	0.285	0.285
	K = 4		0.2	0.25	0.25	0.25
PCM	K = 2	M = 2	—	—	0.055	0.049
		M = 4	—	—	—	—
		M_{max}	—	—	0.055	0.055
	K = 4	M = 2	0.125	0.0625	0.0625	0.0625
		M = 4	0.125	0.125	0.125	0.125
		M_{max}	0.25	0.25	0.25	0.5

2.6 点对点系统的频谱使用

2.6.1 引言

在一般的情况下，点对点系统的频谱利用效率通过复杂的参数给出：

$$SUE = \{M, U\} \quad (44)$$

其中:

- M : 所研究的点对点系统的效用;
- U : 该系统的频谱利用因子。

2.6.2 点对点系统效用的定义

点对点系统的效用可以适用于模拟和数字系统。确定模拟系统效用的参照可以简单地假定为传输的话音信道的数量。但是,在点对点系统中,也需要考虑信息传输的总距离。因此,模拟点对点系统的效用可以定义为:

$$M = n_{vc} \cdot D \quad (45)$$

其中:

- M : 使用模拟点对点系统得到的效用
- n_{vc} : 链路传输的话音信道的数量
- D : 信息传输的距离。

对于一个特定的链路,使用实际的链路长度作为距离 D 。但是,在评估一个一般性的系统时,根据系统的工作频率, D 使用一个典型值。

对于数字系统,可以使用传输速率乘以信息传输的总距离来衡量其效用。

数字系统传输的信息在有用数据之外使用了大量的累加(附加的)数据。这些附加数据包括控制协议、检错和纠错编码以及系统管理的信息。系统的总传输速率由附加数据和有用数据组成。为了衡量传输的有用数据的数量,建议使用一个附加位因子。

$$M = T_{TR} \cdot O_F \cdot D \quad (46)$$

其中:

- M : 使用数字点对点系统得到的效用
- T_{TR} : 系统总的传输速率
- O_F : 附加位因子,其值介于0和1之间
- D : 信息传输的距离。

如果知道消息的传输速率,附加位因子可以用有效传输速率代替。

$$M = E_{TR} \cdot D \quad (47)$$

其中:

- M : 使用数字点对点系统得到的效用
- E_{TR} : 系统的有效传输速率
- D : 信息传输的距离。

如果不可能得到总的或有效的传输速率,可以采用无线电设备所需的最小的传输速率。

2.6.3 点对点系统频谱利用因子的定义

可以使用下面的公式确定点对点系统的频谱利用因子：

$$U = B \cdot S \cdot T \quad (48)$$

其中：

- U : 点对点系统的频谱利用因子
- B : 禁用的无线电频率带宽
- S : 禁用的几何空间（面积）
- T : 禁用时间，设定该值为0到1。

无线电频率带宽 B 为与无线电频率相关的规则中规定的模板。在没有模板的情况下，也可以使用信道的宽度。

在计算禁用的几何空间 S 时，需要同时考虑发射机和接收机造成的禁用面积，这两者都取决于实际的链路参数。禁用的几何空间是发射机和接收机所造成的禁用区域面积 A_S 之和。如果发射机造成的禁用面积包括了全部接收机的禁用面积，则没有必要计算接收机造成的禁用面积。另一方面，在发射机禁用面积之外的接收机的禁用面积需要与发射机的禁用面积相加，以得到总的禁用面积 S 。

为了计算发射机和接收造成的禁用面积，需要考虑天线的方向性图。禁用面积为天线增益基本为常量的扇区面积之和。

$$S = \sum_{i=1}^n A_{S_i} \quad (49)$$

其中：

- S : 禁用的几何空间（ km^2 ）
- A_{S_i} : 第 i 个扇区的禁用面积（ km^2 ）
- n : 扇区的面积。

扇区面积 A_S 可以采用下式计算：

$$A_S = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \theta}{360} \quad (50)$$

其中：

- A_S : 扇区面积（ km^2 ）
- R : 扇区半径（ km ）
- θ : 扇区宽度（度）。

原则上，作为一个一般性的规定，需要分析围绕发射机的整个区域（全部360度）以得到禁用的面积。实际的结果当然会显示出只有确定的宽度，特定的方向（方位）才有关系。因此，在很多情况下，可以只考虑一个扇区，其宽度等于所考虑的天线辐射方向性图包络的天线半功率波束宽度。通过这样的简化，禁用几何空间 S 可以采用下式计算：

$$S = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \theta_{HP}}{360} \quad (51)$$

其中:

- S : 禁用的几何空间 (km^2)
- R : 扇区半径 (km)
- θ_{HP} : 天线半功率波束宽度 (度)。

在计算发射机禁用面积的扇区半径时, 需要考虑到在每个扇区的波束宽度方位上有一个接收机指向发送机。同样, 在计算接收机禁用面积的扇区半径时, 需要考虑到在每个扇区的波束宽度方位上有一个发射机指向接收机。扇区半径可以如下计算:

$$R=10^{A/20} \quad (52)$$

$$A = P_{TX} - L_{C\ TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{C\ RX} - I_{RX} - 20 \log(f) - 32.44 - A_D \quad (53)$$

其中:

- P_{TX} : 发射功率 (dBm)
- $L_{C\ TX}$: 发射电路的损耗 (dB)
- G_{TX} : 在扇区波束中心方向的发射机天线增益 (dBi)
- G_{RX} : 在发射机方向 (方位) 上接收机的天线增益 (dBi)
- $L_{C\ RX}$: 接收机电路的损耗 (dB)
- I_{RX} : 接收机干扰门限 (dBm)
- f : 工作的中心频率 (MHz)
- A_D : 附加的绕射损耗 (dB)。

对于绕射链路, 附加的绕射损耗 A_D 为:

$$A_D = 10 - \frac{20h}{F_1} \quad (54)$$

其中:

- A_D : 附加的绕射损耗 (dB)
- h : 最坏障碍物与视线之间的距离 (如果视线受到遮挡, h 为负值) (m)
- F_1 : 在距离 h 处的第一菲涅尔椭圆半径 (m)。

注1 – 采用的附加绕射损耗仅考虑一个最坏情况的障碍。可以采用其他更符合实际的模型。

对于一般系统分析采用的传播模型为自由空间模型。如果知道系统的位置, 可以采用其他传播模型, 以避免计算过于保守。

接收机干扰门限电平 I_{RX} 可以采用两种方法计算:

方法A

如果知道被干扰系统接收机的信干比的最大值, 可以认为被干扰系统链路接收机接收到的信号 C 等于接收设备的灵敏度, 可以直接得到 I_{RX} :

$$I_{RX} = C - C/I_{MAX} \quad (55)$$

其中:

- I_{RX} : 接收机干扰门限电平 (dBm)
 C : 接收机接收到的信号电平 (dBm), 由接收设备的灵敏度给出
 I_{MAX} : 在接收机处的最大干扰电平。

方法B

如果不知道 C/I_{MAX} 的值, 需要定义在接收机处的所需的最小余量, 才能计算 I_{RX} 。在此情况下:

$$I_{RX} = 10 \log \left[10^{(D+I_{EQ})/10} - 10^{I_{EQ}/10} \right] \quad (56)$$

$$D = D_M - D_S \quad (57)$$

$$D_M = M_C - M_M \quad (58)$$

其中:

- I_{RX} : 接收机干扰门限电平 (dBm)
 I_{EQ} : 参考干扰电平 (dBm), 由被干扰接收机的 C/I_{MAX} 比计算得到, 假定 C 等于接收机的灵敏度
 D : 所分析的发射机可能产生的最大恶化量 (dB)
 D_M : 接收机允许的最大恶化量 (dB)
 D_S : 接收机恶化量的估计值 (dB)
 M_M : 允许的最小余量 (dB)
 M_C : 系统计算的余量 (dB)。

注1 – 对于一般系统的情况, 不可能精确的定义所需的余量, M_C 的值为系统所需的余量。

注2 – 估计的恶化量 D_S 是通过计算所分析的发射机周围的其他发射机的集总干扰得到的。

注3 – 如果没有干扰系统的信息, 应采用3 dB 的恶化量值。

2.6.4 点对点系统的SUE的计算

在本例对点对点系统的分析中, 考虑发射机的禁用面积完全包括了接收机的禁用面积的情况。对于发射机的禁用面积没有完全包括接收机禁用面积的情况, 接收机禁用面积在发射机禁用面积之外的部分应加到发射机的禁用面积当中, 以得到总的禁用面积 S 。接收机禁用面积的计算与发射机的情况相似。

表13给出了用来作为计算点对点SUE计算例子的数字系统的特性。根据这些参数也可以计算出效用的值。

表13

传输速率和附加位因子

无线电频带 (GHz)	总的传输速率 (Mbit/s)	系统的 O_F
8.5	17 (8 × E1链路)	0.9035

示例系统的效用为有效传输速率，是总的传输速率和附加位因子的乘积（公式（46）和（47））。表14显示的是计算得到的有效传输速率的 M 值。

表14

有效传输速率, M

有效传输速率 (Mbit/s)
15.36

表15显示的是工作在特定频带的链路的典型路径长度 D 。

表15

信息传输的距离

距离 (km)
20.1

表16显示的是系统禁用的无线电频率的带宽。

表16

无线电频率带宽

无线电频率带宽 (MHz)
7

此计算示例中考虑系统一直在工作。因此，公式（48）中的时间参数 T 的值假定为1。

下面的表格中表示了确定点对点系统的发射机和接收机的禁用几何空间所需要的计算的结果。为了更好地表述，各个步骤分条目表示。

a) 扇区宽度, θ

对于不同的频带，使用具有特定特性的天线。因此，对于每个频带，假定参数 θ 具有不同的值。表17表示了示例系统采用的扇区宽度和扇区数量。

表17

扇区宽度 (θ)

扇区宽度 (度) ⁽¹⁾	采用的扇区数目 ⁽²⁾
10	3

⁽¹⁾ 对于所考虑的天线辐射方向性图的包络，大致相当于天线的半功率波束宽度。

⁽²⁾ 所考虑的扇区数目。

b) 扇区半径, R

表18表示了不需要额外计算、可以从系统的规范中直接得到的参数的值。

表18
中心频率和发射系统参数

P_{TX} (dBm)	$L_{C\,TX}$ (dB)	$L_{C\,RX}$ (dB)	G_{RX} (dBi)	$f^{(1)}$ (GHz)
24.5	4.4	4.2	36.7	8.45

⁽¹⁾ 射频高端的中心频率。

c) 发射机天线增益, G_{TX}

G_{TX} 是规定的扇区宽度中心处的发射机天线增益。表19表示了根据表17的中的不同扇区宽度 θ 计算得到的 G_{TX} 值。

表19
不同扇区宽度的发射机天线增益*

扇区宽度 θ_1	扇区宽度 $\theta_2^{(1)}$	扇区宽度 θ_3
$G_{TX\,1}$	$G_{TX\,2}$	$G_{TX\,3}$
14.7	36.7	14.7

* 由天线辐射方向性图的包络得到。

⁽¹⁾ 扇区宽度 θ_2 在天线主瓣中心, 波束宽度 θ_1 和 θ_3 与 θ_2 相邻。

根据公式(52)和(53), 考虑到只有发射机的天线增益随扇区的选择而变化, 每个 G_{TX} 值对应一个 R 值。

d) 接收机干扰门限, I_{RX}

建议两种计算接收机干扰门限的方法: 根据接收机的 C/I_{MAX} 直接计算或根据接收机所需的最小余量计算。由于第二种方法需要更多的步骤, 我用这种方法来说明计算过程。

表20显示了根据设备参数得到的典型的 C/I_{MAX} 和 I_{EQ} 的值。这些值用在公式(56)中。

表20
 C/I_{MAX} 和 I_{EQ} 的值

C/I_{MAX} (dB)	系统 $I_{EQ}^{(1)}$ (dBm)
17.0	-105.0

⁽¹⁾ 这些值是考虑 C 等于接收机的门限得到的。

e) 最大恶化量, D

表21是最终确定的示例系统的参数 D_M 、 D_S 、 M_C 和 M_M 以及计算（公式（57）和（58））的得到的 D 值，该值是用在公式（56）中的最终参数。

表21
恶化量参数

计算得到或所需的余量, M_C (dB)	最小余量, M_M (dB)	最大恶化量, D_M (dB)	估计的恶化量, $D_S^{(1)}$ (dB)	产生的最大恶化量, D (dB)
35.8	30.1	5.7	3.0	2.7

⁽¹⁾ 估计的恶化量 D_S 的值应当是在所分析系统周围的干扰系统的集总的效果。如果没有该信息，使用 $D_S = 3$ dB。

使用公式（56）中的 D 值，可以得到 I_{RX} 的值。

附加绕射损耗 A_D 的值对于计算总损耗是必须的，为了确定该值，我们在公式（54）中选取 h/F_1 的值为-2。选取该值，考虑了地球的曲率并且与实际中观测出现的附加绕射损耗相符合。如果注意一下表22中表示的扇区半径，它们与射频使用的干扰限值是一致的，可以验证该值的选取是正确的。

确定了 I_{RX} 和 A_D 之后，可以使用公式（52）计算半径 R 。

至此，可以计算出禁用的扇区面积。表22和23显示了相关的参数。

表22
干扰参数和扇区半径

I_{RX} (dBm)	波束宽度 θ_1		波束宽度 θ_2		波束宽度 θ_3	
	A_1 (dBm)	R_1 (km)	A_2 (dBm)	R_2 (km)	A_3 (dBm)	R_3 (km)
-105.6	12.0	4.0	34.0	49.9	12.0	4.0

表23
扇区面积和禁用的几何空间

波束宽度 θ_1	波束宽度 θ_2	波束宽度 θ_3	禁用的几何空间, S (km ²)
A_{S1} (km ²)	A_{S2} (km ²)	A_{S3} (km ²)	
1.4	217.6	1.4	220.3

由每个扇区的禁用扇区面积的和就得出了禁用的几何空间（ S ），这是确定SUE的最终参数。表24给出了本例的最终结果。

表24
点对点系统的SUE

SUE (Mb/s.km.MHz)
0.2

3 电视和声音广播系统的频谱利用

3.1 引言

假定一个电视或声广播系统位于一个给定的地理区域，共有 J 个发射机。对于一般的情况，频谱利用效率通过复杂的参数给出：

$$SUE = \{M, U\} \quad (59)$$

其中：

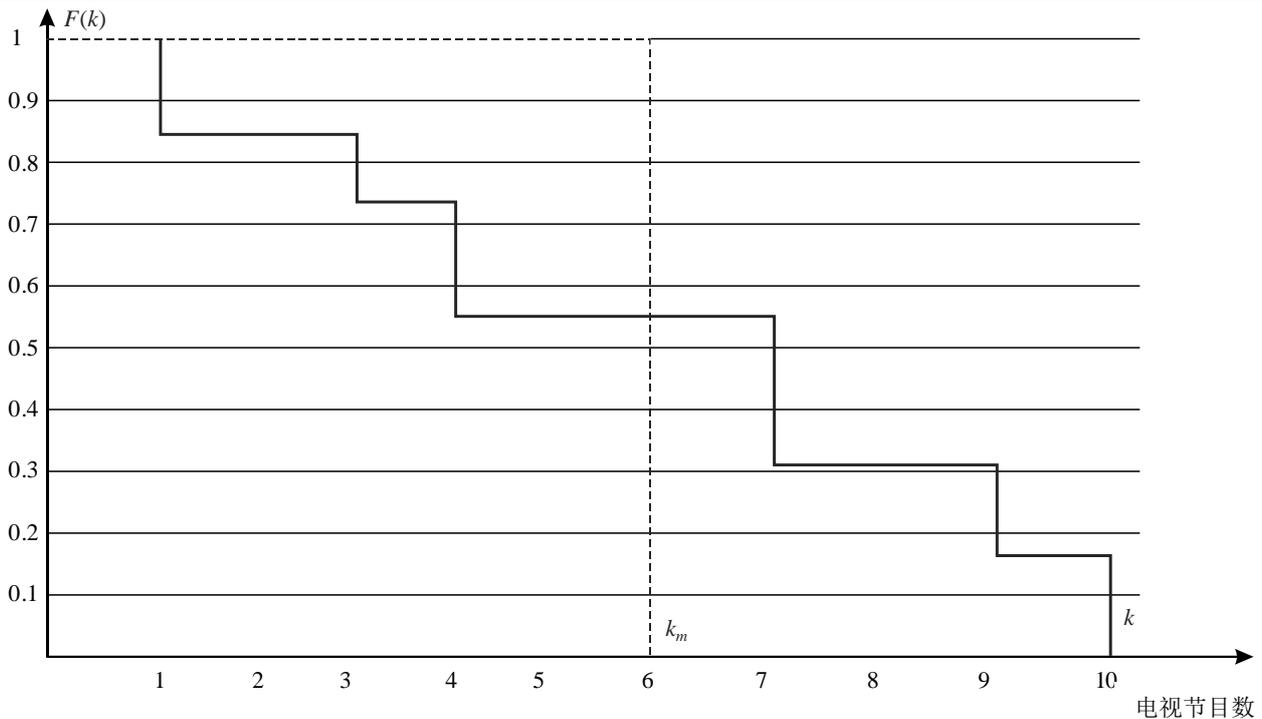
- M : 所研究的广播系统的效用；
- U : 该系统的频谱利用因子。

3.2 电视广播系统的效用的定义

电视广播的有用性由能够接收广播、一般是在其居住地接收的用户（人口）数量确定。

电视广播系统的效用应随着所研究地理区域人口密度以及可以接收到的电视节目数量的变化而变化。电视节目在人口中的可获得性可以用图15的累计分布函数来表示。

图16
通过累计分布函数得出的电视节目在人口中的可获得性



SM.1046-16

在图中， $F(k)$ 是至少可以接收到 k 套节目的用户的比例。函数值越高，享受到较多节目数的用户的数量就越多，因此，在该地理区域的电视广播系统的效用就越大。函数 $F(k)$ 提供了一个对效用的相对完整的表示并且表示出了其结构。但是，从实用的角度看， $F(k)$ 并不特别适用于评估电视广播系统的频谱利用效率。一个更方便的方法是使用一个与 $F(k)$ 存在对应关系的一维的量。已经知道效用随着 $F(k)$ 的增加而增加，可以通过计算曲线下面的面积得到一个简单的量，或用具有相同面积的等效矩形底 k_m （在图15中用点划线表示）表示。后者对应任一给定用户可以接收到的电视节目的均值。这一数目可以用来作为电视广播系统产生的效用的简单指标。这一效用指标的表达式可以用解析式表示：

$$M = k_m = \sum_{i=1}^I \alpha_i k_i \quad (46)$$

其中：

- I : 将地理区域划分成的区域单元的数量；
- $\alpha_i = \frac{n_i}{N}$: 生活在第 i 个区域单元内的人口占总人口的比例；
- n_i : 居住在第 i 个区域单元内的人口数量；
- k_i : 在第 i 个区域单元内可以接收到的电视节目的数量；
- N : 地理区域内的人口规模。

效用计算的示例

考虑一个人口 $N = 250\,000$ 的区域，分为 $I = 9$ 个区域单元。各个区域单元内人口的详细分布和电视节目的接收情况 (n_i 和 k_i) 在表25中给出。

表25
各区域的人口分布和电视节目的接收情况

区域单元	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n_i (千人)	20	10	60	0	100	10	40	10	0
k_i (选项1)	4	2	8	1	10	2	6	4	1
k_i (选项2)	1	2	4	1	4	8	10	6	2

表中第一选项的效用可以根据给出的数据用公式 (46) 计算得到：

$$M = \frac{20 \cdot 4}{250} + \frac{10 \cdot 2}{250} + \frac{60 \cdot 8}{250} + \frac{0 \cdot 1}{250} + \frac{100 \cdot 10}{250} + \frac{10 \cdot 2}{250} + \frac{40 \cdot 6}{250} + \frac{10 \cdot 4}{250} + \frac{0 \cdot 1}{250} = 7.52 \text{ (套节目)}$$

如果如选项2中所示的是频带的分布，但没有完全考虑人口的分布，效用的计算结果是：

$$M = \frac{20 \cdot 1}{250} + \frac{10 \cdot 2}{250} + \frac{60 \cdot 4}{250} + \frac{0 \cdot 1}{250} + \frac{100 \cdot 4}{250} + \frac{10 \cdot 8}{250} + \frac{40 \cdot 10}{250} + \frac{10 \cdot 6}{250} + \frac{0 \cdot 2}{250} = 4.88 \text{ (套节目)}$$

此例显示建议的效用的指标可以作为在所研究的地理区域内发展电视广播系统的策略的一个敏感的度量。

3.3 电视广播系统的频谱利用因子的定义

频谱利用通过考虑现有的电视台对新的电视台造成哪些限制来确定。对于一个位于区域单元 i 的中心的电视台，对它的限制可能是由于考虑与现有电视台的EMC而在该区域单元内禁用的总的电视频道的数量 K_i ，或是用比例的形式表示成 $U_i = \frac{K_i}{K}$ ，其中 K 是电视频道的总数。如果由一个或多个现有的电视发射机产生的有害干扰阻碍了新的电视发射机对应的接收机的正常工作，或是在该频道上的发射信号对与现有电视发射机工作的接收机、包括那些工作在其他电视频道上的接收机产生了不可接受的干扰，则认为EMC的条件没有得到满足。必须要考虑同信道和相邻频道、外差和镜像频道的干扰。

由于这些限制取决于理论上新建电视发射机的位置，因此可以得到多个结果。通过推导所研究区域内不同位置的限制并通过适当的计算，可以将结果简化。最好的方式是计算在理论上新建电视发射机的位置上的限制的加权平均值，加权因子是在每个位置周围居住的人口的比例。通过这样的方法，首先可以认识到分配给电视系统的频谱的值随着人口的增加而增加。其次，它可以将表征频谱利用的两个指标 M 和 U 协调起来。因此频谱利用因子可以用下面的公式确定：

$$U = \sum_{i=1}^I \alpha_i U_i \quad (61)$$

其中:

$U_i = \frac{K_i}{K}$: 对位于区域单元*i*的中心理论上新建电视发射机禁用频带的比例。

3.4 电视广播系统SUE的计算

为了评估电视广播系统的频谱利用, 建议采用下面的步骤:

- 将地理区域分割成3到5 km的单元。
- 确定居住在第*i*个区域单元中的总人口的比例 α_i 。
- 根据其技术特性, 确定现有电视系统发射机的服务区半径 R_s 。
- 计算从每个区域单元*i*的中心到现有系统的发射机的距离 R_{ij} 。
- 对于每个区域单元, 通过比较 R_s 和 R_{ij} 确定其在哪些电视发射机的服务区内。
- 将单个区域单元得到结果进行一般化处理, 使用公式(60)计算出效用。
- 模拟新系统的发射机在区域单元中心处, 计算与现有的和新建的电视发射机工作时在接收机输入端的S/N比。
- 计算不能取得EMC的频带, 其中一方面要考虑新的电视发射机和与其通信的接收机之间的EMC, 另一方面要考虑现有发射机和其接收机之间的EMC。
- 将单个区域单元得到结果进行一般化处理, 使用公式(61)计算出频谱利用因子。

评估的结果可以用地图的形式表示出所研究的区域内的效用和频率利用因子(见图17), 或计算出整个区域的平均值。

3.5 评估声音广播系统SUE的注释

声音广播系统的频谱利用在本质上与电视广播系统在很多方面是相似的。但是由于声音广播系统用户数量中的相当一部分, 或相对来讲经常收听的用户包括私人汽车用户和乘客。因此在计算效用和频谱利用因子时, 有必要考虑广播业务的用户很大一部分在主要道路和高速公路上。

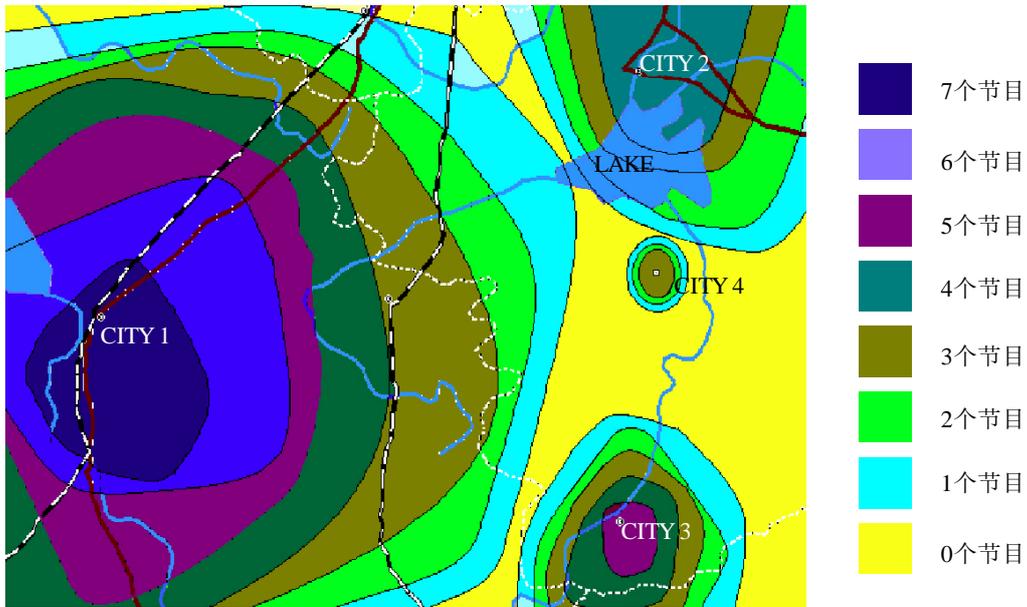
与电视系统一样, 建议在计算一给定地区内可以接收到的声音广播节目的平均数目 k_m 作为效用。同样, 通过计算由于不满足与现有系统的EMC条件, 对给定的新的声音广播系统禁用的频带数目的估计值的加权平均可以得到频谱利用因子。

评估声音广播系统的频谱利用因子需要满足下面的特定条件：

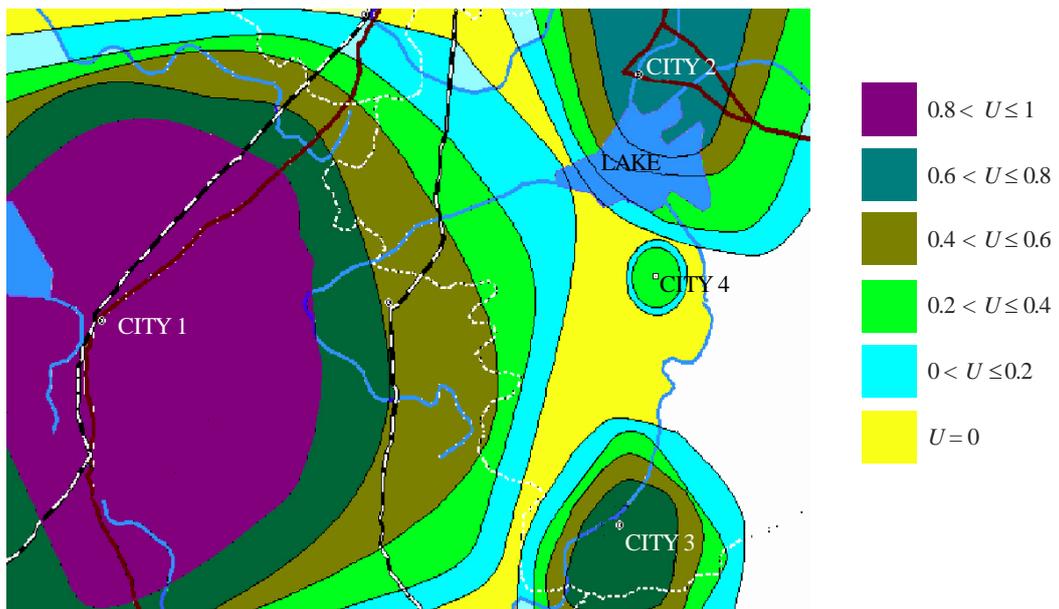
- 包括主要道路的区域单元换算成市区面积（原因是声音广播业务的用户存在）， α_i 因子也要相应地确定。
- 在确定频谱利用因子时，要考虑不兼容频带的合并，这对声音广播系统时典型的情况；因此，也需要考虑声音广播系统可以同频工作而不存在差频和镜像频道干扰。

图17
频谱利用频率的评估

有效作用地图, M



频谱利用因子地图, U



广义指标: ($M=3.2$ 个节目, $U=40$)

SM.1046-17