

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R SM.2269 报告

(06/2013)

**关联电力线通信装置辐射与
电力线通信调制解调器
输出的方法**

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 系列报告	
(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

说明：ITU-R该报告英文版是有关研究组按照ITU-R第1号决议所述程序批准的。

电子出版
2014年，日内瓦

© 国际电联 2014

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

ITU-R SM.2269 报告

关联电力线通信装置辐射与电力线通信调制
解调器输出的方法

(ITU-R 221-1/1号研究课题)

(2013)

目录

页码

1	引言	1
2	耦合损耗方法	2
3	辐射点源方法	9
4	电力线路上循环RF电流、室内PLT装置的RF骚扰和等效天线特性的实验测定	16

1 引言

研究80 MHz以上电力线通信（PLT）影响的关键部分是研发评估通过PLT调制解调器注入到电力线路的RF能量有多少被辐射的手段，这样的工具将作为下列评估的基础：

- 评估关于辐射发射的电磁兼容性（EMC）限值；
- 测定由此引起的本底噪声的增加；以及
- 评估对无线电通信业务产生干扰的可能性。

如果证实有可能将来自PLT装置的辐射发射与直接可测量的参量PLT调制解调器功能谱密度和总的输出功率有关，则通过ITU-R和ITU-T建议书提供有关PLT部署准则的工作会变得更加容易。ITU-T G.9960建议书族包含了一个工具包，该工具包使国家管理人员能够按照当地市场情况调整功率谱密度（PSD）频谱掩模和总的输出功率，缺少的是将无线电通信业务不能承受的无线频率噪声和干扰电平限值与PLT调制解调器的注入功率和频谱密度进行关联的方法。

为了将PSD电平作为评估和控制PLT装置辐射发射的一个基准，需要一些测定典型PLT装置中有代表性的耦合损耗的方法，以便实现典型PLT装置的辐射量与调制解调器PSD以及总的输出功率的直接关联。

多项ITU-R研究已经包含在ITU-R SM.2158报告中，该报告说明了对PLT系统辐射对于运行在80 MHz以下广播系统的影响进行测量时的相关技术和成果，下列研究包含在测量HF频段PLT辐射的ITU-R SM.2158报告的附录中：

- 研究A3.1（巴西）– 关于单点接入PLT系统辐射电场测量的报告，该报告断定接收位置上的干扰场强不应超过16 dB(μ V/m)，可能低于环境的背景噪声，而不是测量得到的60 dB(μ V/m)。

- 研究A3.2 (NABA/CRC) – 关于室内PLT系统辐射电场测量的报告, 该报告显示在3 m到10 m处接收到的PLT信号约为50-60 dB(μ V/m)。
- 研究A3.5.3 (IUCAF) – 关于独立房屋内PLT系统辐射电场测量的报告, 该报告显示在10 m处接收到的PLT信号约为50 dB(μ V/m)。

该报告聚集了旨在制定一种关联PLT装置辐射发射与调制解调器输出和频谱密度的方法的多项研究。

2 耦合损耗方法

该项研究由北德广播电台 (NDR) 和德国电视二台 (ZDF) 开展, 旨在通过考虑相关的耦合损耗来评估PLT装置的辐射发射, 其目的是研发一种方法, 采用该方法能够确定典型情况下总的耦合损耗的数值, 从而将该项技术扩展到一系列有代表性的情况。

该项研究继续进行的是在这里的第3.2.1节介绍的干扰测量, 以便探索简化评估来自PLT装置的辐射发射的方法。在评估来自PLT系统的辐射将如何被接收机当作传统的噪声或干扰时有多个相关的步骤, 不幸的是, 相关步骤中没有一步容易建模或者测量, 具有确定性和可重复性的可测量参量是由PLT调制解调器注入到电力线路的PSD。

当注入的PSD电平能够作为设置不能承受的噪声和干扰电平时的基准时, 管理机构、管理者和标准化组织的任务将是一个简化者。这将需要一种方法能够评估典型PLT装置中有代表性的耦合损耗, 从而实现典型PLT装置的辐射量能够直接与调制解调器PSD和总的输出功率相关联。

NDR/ZDF研究的目标是模拟沿着从注入电力线路的RF能量、然后注入到辐射部分的RF能量、最后注入到建筑物内可以接收部分的RF能量的整个链路的耦合损耗。如果这些耦合损耗能够合并为一个有代表性的总的耦合损耗, 则能够由已知它们的总的输出功率和PSD特性来评估PLT设备的潜在干扰。

为了给建模设置一个可重复的基础, 本项研究采用DVB-T调制器产生一个具有已经频谱特性的宽带RF信号。

2.1 测量基本原理

采用天线来测量PLT装置辐射发射的电平是困难的, 因为PLT调制解调器注入电力线的功率是随着时间变化的。在空闲模式下, 只会出现一些信号尖峰。只在数据传输期间才会发射最大的功率, 通常不稳定。

PLT调制解调器的输出功率对于设备厂商来说是已知的, 当插入电力线墙壁插座的PLT调制解调器和天线输出端之间的耦合损耗已知时, 就能够计算得到在规定的接收天线输出端的干扰功率电平。当已知接收机输入端最大的干扰电平时, 耦合损耗也能用于计算最大容许的PLT调制解调器输出功率或者PSD。

对耦合损耗进行充分的测量是非常费时的，因为必须考虑到不同类型的建筑物、电力线路、不同的天线位置等。一种更加有效的方法是建立采用不同电力线路的多种建筑物类型的模型，将PLT调制解调器连接至不同位置的电力线，采用电磁辐射计算工具，以便获得PLT调制解调器和建筑物内天线接收到的信号电平之间的耦合损耗。天线必须放置在多个不同的地点和位置。针对不同的电力线路模型和假设，可以计算多个耦合损耗值，从而形成一种很好的统计方法。耦合损耗值能够通过一些典型的测量得到验证。

为了得到VHF频段上耦合损耗的一些试验值，IRT¹在实验室和德国乡村地区的典型非独立房屋内开展了测量工作。

2.2 测量装置

最开始的耦合损耗测量是在IRT实验室内进行的，只是为了得到关于耦合损耗的一些感觉，然而实验室不是典型的广播接收地点。实际的耦合损耗测量是在德国乡村地区的一个典型的非独立房屋内进行的，该房屋用砖建成，包括采用混凝土地板/天花板的底层以及上面两层，如图1所示。

图1

测量PLT调制解调器到偶极子天线的耦合损耗的非独立房屋（中间的）



SM.2269 报告 -01

为了测量辐射的和接收到的干扰功率，必须将具有已知电平的稳定信号注入到电力线中。PLT调制解调器的输出不完全适合，因为它不稳定。由于PLT系统采用COFDM信号用于数据传输，我们采用一个相似的信号DVB-T信号用于测量。罗德施瓦茨（R&S）SFQ信号发生器将频率为198.5 MHz、带宽为7 MHz的DVB-T信号馈入房屋的电力线，如图2所示。

¹ IRT（广播有限公司）是德国、奥地利和瑞士公共服务广播设备的研发机构，位于德国慕尼黑。

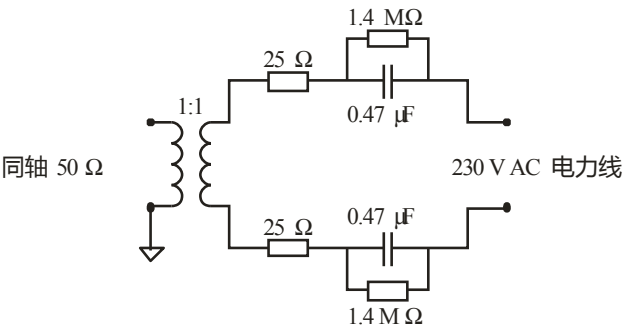
图2
馈入DVB-T信号至电力线的信号发生器SFQ



SM.2269 报告 -02

实现从同轴50 Ω发生器输出端到对称电力线的匹配以及230-V隔离的电路如图3所示。

图3
匹配和隔离电路



SM.2269 报告 -03

当线路阻抗低于1000 Ω时（即100 Ω时的衰减为3.5 dB），该电路能够明显地衰减发生器的信号。线路阻抗取决于一些无法控制的参数。对于这里的相关计算来说，认为匹配电路将DVB-T信号衰减了3 dB。

一副垂直极化地面天线用于信号接收，如图4所示，天线放置在地面上方1.5 m处，与一台频谱分析仪连接，以便测量接收到的信道功率。地面天线增益为0 dB_d，与λ/2偶极子天线的增益相同。

图4
垂直极化地面测量天线

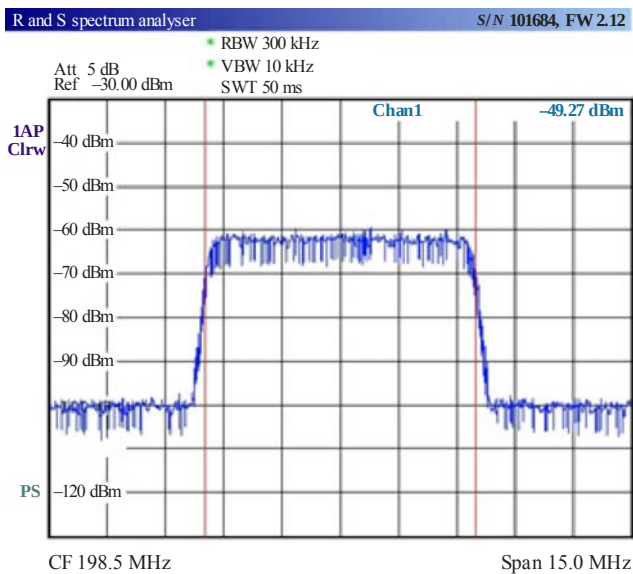


SM.2269报告 -04

所使用的频谱分析仪是R&S ETL，该仪器能够测量给定带宽上的功率。为了校准测量装置，SFQ信号发生器的功率电平设置为-50 dBm，直接与ELT连接并通过ETL进行测量，将信道带宽设置为7 MHz。测量得到的频谱如图5所示，测量得到的信道功率为-49.27 dBm，这意味着测量误差小于1 dB。

对于下面所有的测量，频谱分析仪的设置保持不变。

图5
用于测量的DVB-T信号的频谱
(发生器的电平为-50 dBm)



SM.2269报告 -05

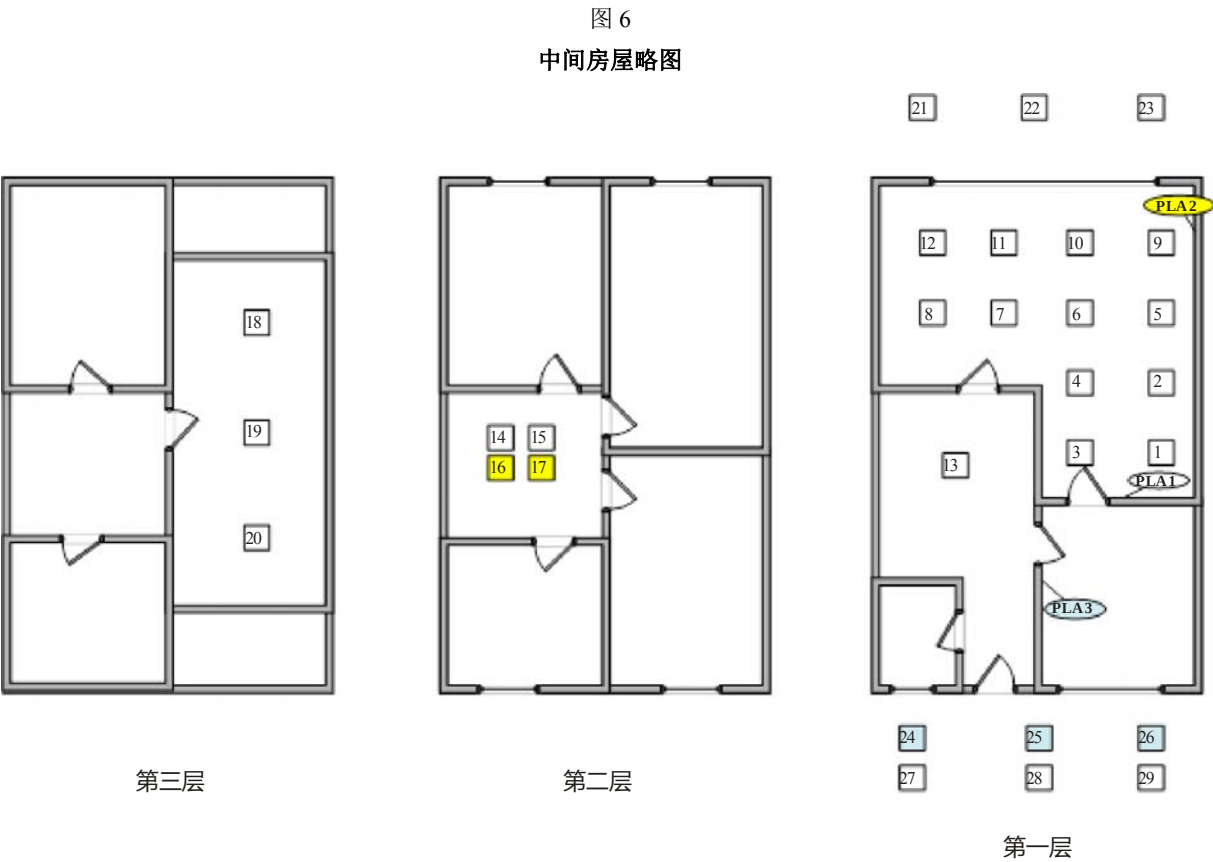
2.3 测量结果

2.3.1 IRT实验室内的测量结果

DVB-T信号发生器插入到电力线墙壁插座，在实验室内六个地点测量放置在地面上方1.5 m处地面天线输出端的信号功率。

2.3.2 非独立房屋内的测量结果

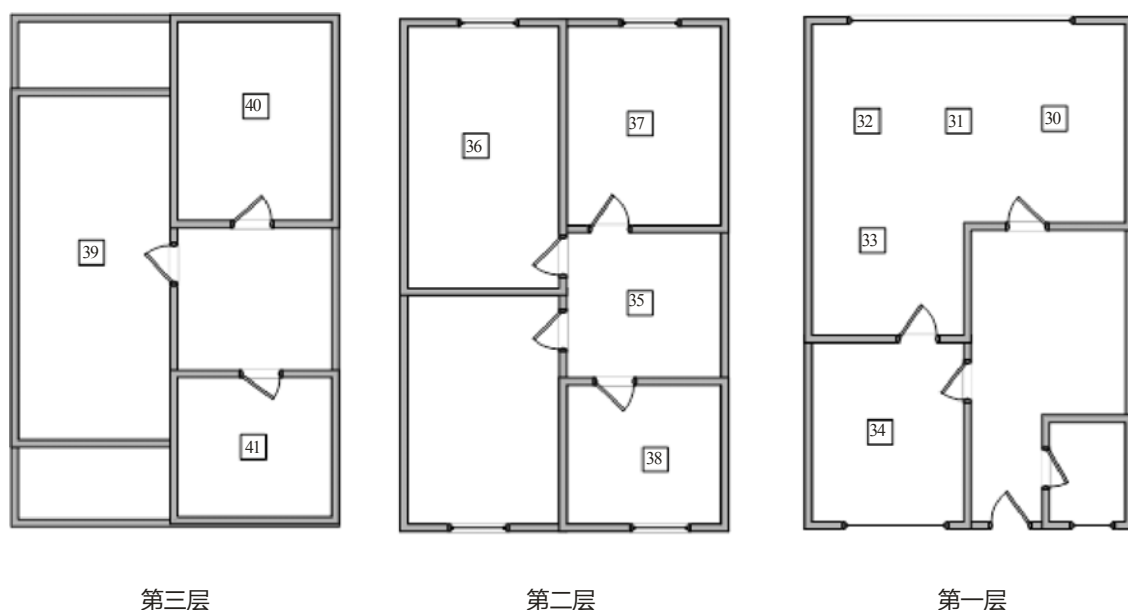
开展测量的房屋用砖建成，包括采用混凝土楼板/天花板的底层及上面两层，如图1所示。实际上，有左边、中间和右边三个相邻的房屋。中间房屋略图见图6，左边相邻房屋略图见图7。测量信号连接到中间房屋第一层的墙壁电源插座。



SM.2269 报告-06

DVB-T发生器输出功率设置为0 dBm，相继插入位于第一层的点PLT调制解调器1（白色）、PLT调制解调器2（黄色）和PLT调制解调器3（蓝色）处的墙壁插座，在中间房屋的点1至29以及左边相邻房屋的点30至42进行测量。当进行测量时（PLT调制解调器1、2或3），测量点的颜色与发生器接入点的颜色相对应。

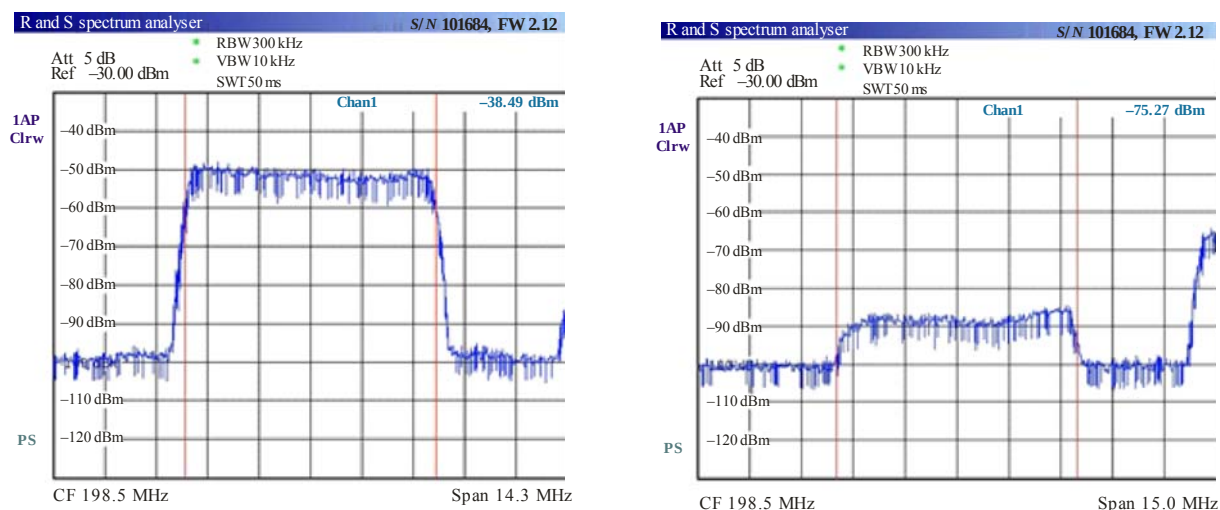
图7
左边相邻房屋略图



SM.2269 报告-07

天线放置在图6和图7中用带编号正方形表示的测量点上，对于每个测量点，记录下ETL-SA中的频谱，而且显示接收到的信道功率。例如，图8中显示的是在潜在的高PLT干扰电平点和潜在的低PLT干扰电平的测量结果。

图8
在高、低电平干扰两个测量点的频谱



SM.2269報告 -08

- a. 测量点1：高电平干扰
- b. 测量点39：低电平干扰

在图8b的右边、超出了DVB-T测量带宽的信号是在该地区发射的DAB信号。

将信号注入中间房屋第一层房间内的电力线，在相邻的房间、房屋的第二层和第三层以及房屋外进行测量。

还可以在左边相邻房屋的第一层、第二层和第三层进行测量。

2.4 耦合损耗测量结果

2.4.1 IRT实验室的结果

由六个测量点计算得到的平均耦合损耗数值为 -47 dB，数值的标准差为6 dB。

2.4.2 中间房屋内的测量结果

PLT调制解调器输出端与相同房屋内接收天线输出端之间的耦合损耗在48 dB 到 57 dB范围内变化，测量值的波动较大，其标准差约为6 dB。在建筑物的外边，到建筑物前面距离房屋墙壁4 m处的耦合损耗为57 dB，到房屋后面距离房屋墙壁10 m处的耦合损耗为60 dB。实际测量得到的耦合损耗平均值为：

- 同一房间：48 dB
- 到相邻的房间 44 dB
- 到上面的楼层 54 dB
- 到上面两层 57 dB
- 到建筑物外边距离4 m处 57 dB
- 到建筑物外边距离10 m处 60 dB

2.4.3 相邻房屋内的测量结果

中间房屋内PLA 1输出端和左边相邻房屋内接收天线输出端之间的耦合损耗在62 dB 到 70 dB的范围内变化，与距离和楼层有关。测量得到的平均值为：

- 在同一楼层 62 dB
- 在上面楼层 62 dB
- 在上面两层 70 dB

2.5 最大容许的PLT调制解调器输出功率的示例计算

为了避免干扰DAB接收，将由下列前提开始计算PLT调制解调器输出端的最大容许功率：

- 对200 MHz DAB接收的干扰增长相对于总的接收噪声功率不应超过1%；
- PLT装置在发射其功率，该功率在30 MHz到300 MHz的频谱上均匀分布；
- DAB接收机噪声系数（F）为8 dB；
- DAB接收天线增益为 -2.2 dBd；
- 采用上述天线在200 MHz处的人为噪声（MMN）容许值为2 dB；
- 在相邻房间内进行DAB接收，那里的耦合损耗为62 dB。

PLT调制解调器的COFDM信号骚扰像白噪声，如果初始的干扰电平增长不会超过1%，则PLT调制解调器干扰功率应比接收机输入端的等效总的接收噪声电平低20 dB。

接收机输入端的等效噪声电平是热噪声电平加上接收机噪声系数再加上MMN，MMN是天线接收到的人为噪声的容许值。当用PSD代替功率时，测量结果不取决于信号带宽。

20°C时热噪声PSD为-174 dBm/Hz，加上了F和MMN之后，接收机输入端的本底噪声PSD为-164 dBm/Hz。

PLT干扰应至少比本底噪声低20 dB，即 -184 dBm/Hz。

假设PLT调制解调器到偶极子天线的耦合损耗为62 dB，DAB接收天线相对于偶极子天线的增益为 -2.2 dB，这样PLT调制解调器到DAB接收机的总的耦合损耗为64.2 dB，把耦合损耗加到本底噪声PSD上，我们会得出PLT调制解调器输出PSD应小于 -119.8 dBm/Hz。

因此，从30 MHz到300 MHz的总的输出功率不会超过 -35.5 dBm。

2.6 结论

当PLT调制解调器输出端和接收机天线输出端之间的耦合损耗已知时，能够基于PLT调制解调器输出端PSD来计算接收机输入端的干扰功率，反之亦然，通过设置接收机输入端的最大容许干扰电平，可以使用耦合损耗来计算最大容许的PLT调制解调器输出信号PSD。

在实验室和德国乡村的典型非独立房屋内，测量从连接电源插座的PLT调制解调器到VHF频段垂直极化偶极子天线输出端的耦合损耗，得到房屋内的耦合损耗值在48 dB 到57 dB范围内，相邻房屋之间的耦合损耗值在62 dB 到70 dB范围内。

根据测量结果，如果对于VHF频段内的DAB接收，相邻房间内干扰功率不会使得整个接收系统噪声功率增长超过1%，则最大的PLT调制解调器输出信号PSD不应超过-120 dBm/Hz。

测量得到的耦合损耗和计算得到的最大PLT调制解调器输出信号PSD电平，对于与开展测量的房屋相似、具有相似电力线路的房屋均有效。对于其它的房屋类型和电力线路，数值可能会明显地不同。

3 辐射点源方法

本节考虑PLT对于450 MHz到470 MHz频段上移动蜂窝通信的影响。电力线路作为一种分布式辐射源，其复杂的特性已经成为所有试验和理论上评估250 MHz以下频率PLT影响的一个日益复杂的因素。然而，在某些频率，实际情况是与一定长度电力线路连接的PLT调制解调器的表现更像一个点源。

“集肤效应”使得沿着电力线路的衰减会随着频率而增加，因此当工作频率上升时，只有接近注入点的一小段电力线路能够辐射，PLT辐射发射问题简化为其辐射相当于来自各个连接点的一小段电力线路的点源的若干个PLT调制解调器的辐射发射问题。出于同样的原因，电力线路上的通信可能要更多地归功于各个连接点的辐射和接收，而不是通过沿着整个电力线路传导的、经过衰减的PLT信号。

关于沿着典型电力线路的特性什么时候会发生这样一种转变，没有有用的信息，但很显然，将简单点源模型用于评估与PLT辐射发射有关的耦合损耗，随着频率的上升这一方法将会变得更加适合。

3.1 保护蜂窝移动业务的方法和计算

GE06区域性协议引用了 ITU-R M.1767和ITU-R F.1670建议书，以便保护移动和固定业务免受数字TV干扰。在下面第3.2节中描述的计算方法是基于同样的方法，并且提供了干扰门限和PLT辐射发射掩模。

考虑距离（PLT到受害接收机的距离；见表1第3行括号中的距离）和以前指定的假设，能够导出以下触发电平和最大容许的PLT峰值功率值：

表1
对于80-470 MHz不同受害接收机的触发电平和最大PLT峰值功率

每1MHz的功率和场强	室内 蜂窝终端或家庭基站	室外宏蜂窝/微蜂窝 基站和固定站	室外 无线电定位站
功率触发电平（dBm）	-129	-141	-149
场强触发电平（dBμV/m）	1.5	-10.5	-18.5
最大PLT峰值功率（dBm）	-103 （1 m）	-95 （10 m）	-83 （100 m）

分析PLT辐射发射对家庭通常使用的一种陆地业务接收产生的干扰，也可以用于保护VHF和UHF频段上的宽带业务。此外，该方法也可以为研究保护无线电通信业务免受工业、科学和医学（ISM）和有线TV分配装置的无意发射提供有用的基础。

陆地接收机容忍的灵敏度下降为0.05 dB；容许的干扰信号要比噪声门限低20 dB；触发电平为KTBF -20 dB。如果陆地业务接收机容忍的灵敏度下降为0.5 dB，则容许的干扰信号要比噪声门限低10 dB，表1中的所有数值均要提高10 dB。

保护室内陆地业务免受PLT干扰的最坏情况是蜂窝手机，因为蜂窝手机距离PLT仅1 m。为了给VHF/UHF频率范围内陆地业务的弱信号运行提供充分的保护，在距离PLT装置1 m的室内测量得到的PLT设备或装置的辐射在1 MHz BW上不应超过1.5 dBμV/m的最大值；参见表4中的附加值。假设自由空间传播且不存在墙壁衰减，则场强与频率无关。功率取决于RF；当RF为460 MHz时，最大容许的PLT峰值功率为 -103 dBm/MHz。为了获得0.5 dB（不是0.05 dB）的衰落储备下降，在距离PLT装置1 m的屋内测量得到的辐射数值在1 MHz BW上为11.5 dBμV/m，RF为460 MHz时，PLT容许的峰值功率为 -93 dBm/MHz。

保护室外陆地业务免受PLT干扰的最坏情况是距离PLT 10 m的蜂窝基站或固定站，在这种情况下，对于0.05 dB的衰落储备下降，最大的PLT峰值功率为-95 dBm/MHz，对于0.5 dB的衰落储备下降，最大的PLT峰值功率为-85 dBm/MHz。

3.2 评估PLT辐射发射的计算方法

在评估无线电通信系统对于干扰的脆弱性的时候，为了计算相关的功率和场强触发电平，可以用噪声系数 G_i 和 L_F 参数来表示无线电通信系统的特征，注意到由于传播会随着频率而变化，容许的PLT辐射发射掩模要取决于有用的频率 R_F 。

在计算时会用到以下参数：

- F : 地面移动站接收机的接收机噪声系数 (dB)；
- B : PLT干扰系统的参考带宽 (BW) (MHz)；
- g_i : 地面站 (手机或B) 接收机天线增益 (数字)；
- G_i : 蜂窝站 (手机或B) 接收机天线增益 (dBi)；
- L_F : 天线电缆馈电损耗 (dB)；
- f : 基准频率 (MHz)；
- $P_{handset}$: 蜂窝手机的功率触发电平/MHz (dBm)；
- P_{BS} : 地面基站 (BS) 的功率触发电平/MHz (dBm)；
- P_{RL} : 无线电定位站 (RL) 的功率触发电平/MHz (dBm)；
- $E_{handset}$: 蜂窝手机的场强触发电平/MHz (dB μ V/m)；
- E_{BS} : 地面基站的场强电平/MHz (dB μ V/m)。

3.2.1 保护陆地业务免受PLT辐射的触发电平

当BW=1 MHz且典型噪声系数 (F) 为5 dB时，无损全向天线接收机处的热噪声功率KTBF²等于：

$$KTBF/1 \text{ MHz} = -114 + 5 = -109 \text{ dBm/MHz} \quad (1)$$

$$KTBF - 20 \text{ dB (1 MHz)} = -109 \text{ dBm} - 20 \text{ dB} = -129 \text{ dBm/MHz} \quad (2)$$

由于手机无法获得天线增益，适用于蜂窝手机的保护准则是1 MHz带宽基准信号的PLT辐射发射不应超过：

$$P_{handset} (1 \text{ MHz}) = -129 \text{ dBm/MHz} \quad (3)$$

对于蜂窝网络基站，参数 $G_i = 15 \text{ dBi}$ 和 $L_F = 3 \text{ dB}$ 适用于确定针对PLT辐射发射的保护要求。因此，基站天线输入端的功率触发电平由下式给出：

² 对于k: 玻尔兹曼常数 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $T \sim 300 \text{ 开尔文}$ 和 $B = 1 \text{ MHz}$ KTB因子等于-114 dBm。

$$P_{BS}(1 \text{ MHz}) = -129 \text{ dBm/MHz} - 15 \text{ dB} (G_i) + 3 \text{ dB} (L_F) = -141 \text{ dBm/MHz} \quad (4)$$

通过比较，对于无线电定位接收机，参数 $G_i = 23 \text{ dBi}$ 和 $L_F = 3 \text{ dB}$ 适用于确定针对PLT辐射发射的保护要求。因此，无线电定位天线输入端的功率触发电平由下式给出：

$$P_{RL}(1 \text{ MHz}) = -129 \text{ dBm/MHz} - 20 \text{ dB} = -149 \text{ dBm/MHz} \quad (5)$$

采用标准方程：

$$P_r = \frac{E^2 g \lambda^2}{Z_0 4\pi} = \frac{E^2 g c^2}{480\pi^2 f^2}$$

天线输入端的电场强度（dB μ V/m）与功率（dBm）之间的转换公式为：

$$P(\text{dBm}) = E(\text{dB}\mu\text{V/m}) - 77.21 - 20 \log f(\text{MHz}) + G_i - L_F \quad (6)$$

由于接收机输入端的等效噪声电平（即噪声系数、1 MHz带宽基准频率 R_F 为460 MHz）相同，场强上的差异源自接收天线的不同增益和损耗。

当基准频率 R_F 为460 MHz时，转换公式（6）为：

$$-129(\text{dBm}) = E(\text{dB}\mu\text{V/m}) - 77.21 - 53.25 \quad (7)$$

因此：

$$E_{handset}(1 \text{ MHz}) = 1.5(\text{dB}\mu\text{V/m}) \quad (8)$$

$$E_{BS}(1 \text{ MHz}) = E_{fixed}(1 \text{ MHz}) = 1.5(\text{dB}\mu\text{V/m}) - 12 \text{ dB} = -10.5(\text{dB}\mu\text{V/m}) \quad (9)$$

$$E_{RL}(1 \text{ MHz}) = E = 1.5(\text{dB}\mu\text{V/m}) - 20 \text{ dB} = -18.5(\text{dB}\mu\text{V/m}) \quad (10)$$

3.2.2 为了保护陆地业务的容许的PLT辐射发射电平掩模

假设从当作一个点源的PLT辐射发射到陆地无线电接收机的自由空间传播采用ITU-R P.525建议书的方程（4），距离 d 以米（不是km）计。

$$L_{bf} = -27.6 + 20 \log f + 20 \log d(\text{dB}) \quad (11)$$

因此，为了保护距离PLT源1 m的蜂窝手机， $f = 460 \text{ MHz}$ 时最大容许的PLT峰值功率 P_{PLT} 为：

$$\begin{aligned} P_{PLT}(\text{dBm/MHz}) &= P_{handset}(\text{dBm/MHz}) + L_{bf} = -129 - 27.6 + 20 \log f + 20 \log d \\ &= -129 - 27.6 + 20 \log 460 + 20 \log 1 = -129 - 27.6 + 53.3 \approx -103(\text{dBm/MHz}) \end{aligned} \quad (12)$$

同样地，为了保护距离PLT源10 m的IMT/蜂窝基站， $f = 460 \text{ MHz}$ 时最大容许的PLT峰值功率 P_{PLT} 为：

$$\begin{aligned}
 P_{PLT} \text{ (dBm/MHz)} &= P_{BS} \text{ (dBm/MHz)} + L_{bf} \\
 &= -141 - 27.6 + 53.3 + 20 \log 10 \approx -95 \text{ (dBm/MHz)}
 \end{aligned} \tag{13}$$

为了保护距离PLT源100 m的无线电定位接收机， $f = 460$ MHz时最大容许的PLT峰值功率 P_{PLT} 为：

$$\begin{aligned}
 P_{PLT} \text{ (dBm/MHz)} &= P_{RL} \text{ (dBm/MHz)} + L_{bf} \\
 &= -149 - 27.6 + 53.3 + 20 \log 100 \approx -83 \text{ (dBm/MHz)}
 \end{aligned} \tag{14}$$

3.3 评估PLT装置的总的辐射发射的计算方法

本小节讨论的是在多个PLT调制解调器同时工作的情况下，与PLT装置的总的辐射发射有关的评估。由于PLT装置由多个在相同频率上单独发射的PLT调制解调器组成，这些多重发射的叠加潜在地形成了PLT装置对无线电通信业务的有害干扰。就此而论，在特定的测量距离，来自PLT调制解调器的多重辐射发射分别具有随机变化的不同相位。这种随机特性导致在受害接收机端会随机地出现有益的和有害的干扰。

尽管多个PLT调制解调器具有相同的发射功率，但在相同的距离，来自这些PLT调制解调器的辐射发射可能因PLT装置的环境而不同。因此，在评估PLT装置对无线电通信业务的影响时应考虑场强。在许多国家中，按照ITU-R SM.1879建议书的描述，来自PLT系统的辐射发射也应在电场强度域内得到允许。为了评估来自PLT装置的总的辐射发射的电场强度，ITU-T K.62建议书中提出的概率法被应用于考虑由受害接收机端多个干扰信号的随机相位差产生的电场变化。因此，本小节提供了一种从概率法的观点评估来自PLT装置的总的辐射发射的计算方法。

3.3.1 数学模型

考虑到存在来自PLT装置的辐射发射，该装置由围绕受害接收机的多个PLT调制解调器组成，如图9所示。这里，在图9中， r_i 是第*i*个PLT源与测量点之间的距离，是第*i*个PLT源与受害接收机之间的距离。在受害接收机端来自PLT装置的总的辐射发射的幅度可以用下面的数学表达式表示：

$$E_{oi}(t) = \sum_{i=1}^N E_{oi} \cos(\omega_c t + \theta_i) = E_o \cos(\omega_c t + \alpha) \tag{15}$$

其中

E_o ：在受害接收机端的总的辐射发射的幅度（ $\mu\text{V/m}$ ）

N ：PLT源的数量

E_{oi} ：在测量距离上第*i*个PLT源的辐射发射的幅度（ $\mu\text{V/m}$ ）

ω_c ：角频率（Hz）

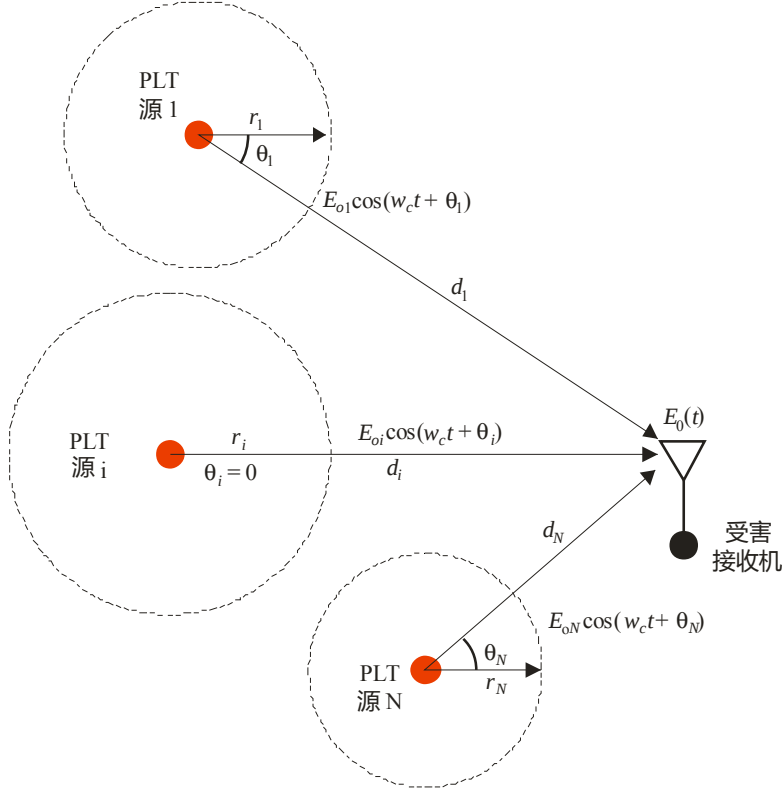
θ_i ：来自第*i*个PLT源的辐射发射和受害接收机端某些约定的基准之间的相位差（弧度）

α : 总的辐射发射和受害接收机端某些约定的基准之间的相位差（弧度）。

本小节的目的是在来自PLT装置的总的辐射发射幅度 E_o 大于保护受害接收机所需电平 E_{PR} 的情况下，计算干扰情况 $\{E_o > E_{PR}\}$ 发生的概率。

图9

在受害接收机端来自PLT装置的总的辐射发射的几何形状



SM.2269 报告-09

为了计算干扰事件 $P_r\{E_o > E_{PR}\}$ 的概率，与ITU-T K.62建议书的做法一样， θ_i 在统计上用 $[-\pi, \pi]$ 区间上概率密度函数为 $1/2\pi$ 的均匀随机变量（RV）模拟。采用简单的远场传播，以对数单位（dB μ V/m）计的、在距离处来自第 i 个PLT源的辐射发射的幅度为：

$$E_{oi}^{dB}(d_i) = \sum_{oi}^{dB}(r_i) - 20 \cdot \beta \cdot \log_{10}(d_i / r_i) \quad (16)$$

其中，是采用对数单位（dB μ V/m）的距离处辐射发射的幅度， β 是波传播系数，在自由空间传播的情况下， β 等于1。采用ITU-T K.62建议书的方程（3），可得在受害接收机端来自PLT装置的总的辐射发射的幅度：

$$E_{oi} = \sqrt{\sum_{i=1}^N E_{oi}^2(d_i) + 2 \sum_{j>i}^N \sum_{i=1}^N E_{oi}(d_i) E_{oj}(d_j) \cos(\theta_i - \theta_j)}, \quad i < j \leq N \quad (17)$$

因此，计算干扰事件概率可以采用方程（17）和均匀随机变量RV θ_i ; $i = 1, \dots, N$ 。

3.3.2 举例

例如，为了计算，我们将室外基站作为一个在有PLT装置的情况下、保护电平为= 0.3 $\mu\text{V/m}$ (= -10.5 dB $\mu\text{V/m}$)的受害接收机，该保护电平等于在先前第3.1.1节中得到的数值，PLT装置的参数如表2所示。

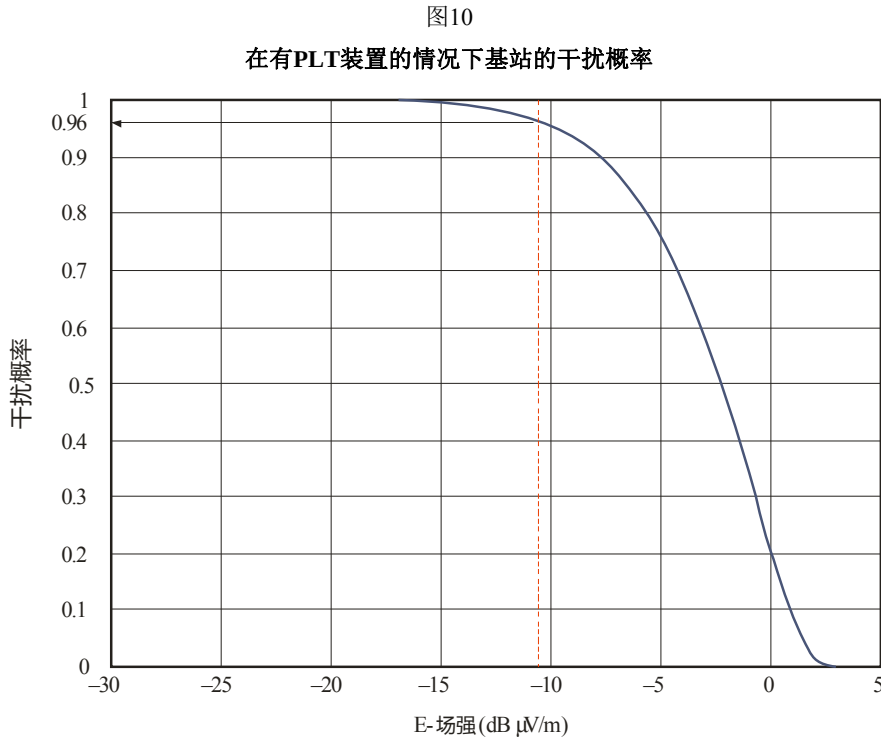
表2
参数汇总表

参数	数值	备注
PLT源的数量 (N)	5	假设的PLT装置环境
在测量距离10 m处PLT源的场强(r_i)	37 dB $\mu\text{V/m}$ *	5个具有共同发射幅度的PLT源
公共频率	460 MHz	见方程(9)
波传播系数 (β)	2	非视距
PLT源和受害接收机之间的距离 (d_i)	100、150、200、 250和300 m	假设的PLT装置环境

* 该数值是无线电干扰国际特别委员会（CISPR）出版物22中描述的信息技术设备的B类发射限值。

如图10所示，在有PLT装置的情况下，基站的干扰概率约为0.96。相比较在受害接收机端具有80% CISPR置信水平的干扰概率为0.96，= 0.2 或 = 0.8，可以得出在表2中描述的PLT装置对拥有保护电平为-10.5 dB $\mu\text{V/m}$ 的室外基站产生了干扰。

该例子表明所提出的计算方法能够用于评估PLT装置的总的辐射发射。



SM.2269 报告 -10

4 电力线路循环RF电流、室内PLT装置的RF骚扰和等效天线特性的实验测定

测量得到的由PLT系统产生的RF骚扰、CM和DM电流，以及室内电力网络的天线特性

ITU-R SM.2158报告第2章提到电力线路类似天线的辐射效应和建筑物的屏蔽效应很复杂，因房屋不同而不同、国家不同而不同，取决于当地建筑物结构和电力线路实际情况。如果为了管理PLT装置的潜在干扰，研发了基于理论或统计考虑的建模方法，则应通过实际情况下的实验和测量来验证对它们的预测及其范围。本节提供了在日本开展的现场试验的结果。

4.1 测量得到的来自PLT系统的RF骚扰³

无线电通信业务主要关注的是在已经安装了PLT系统的建筑物外面，相对于环境噪声电平的骚扰场强。在这些实验中，采用无源环形天线测量场强，天线放置在离安装了PLT系统的房屋外墙10 m的地方。

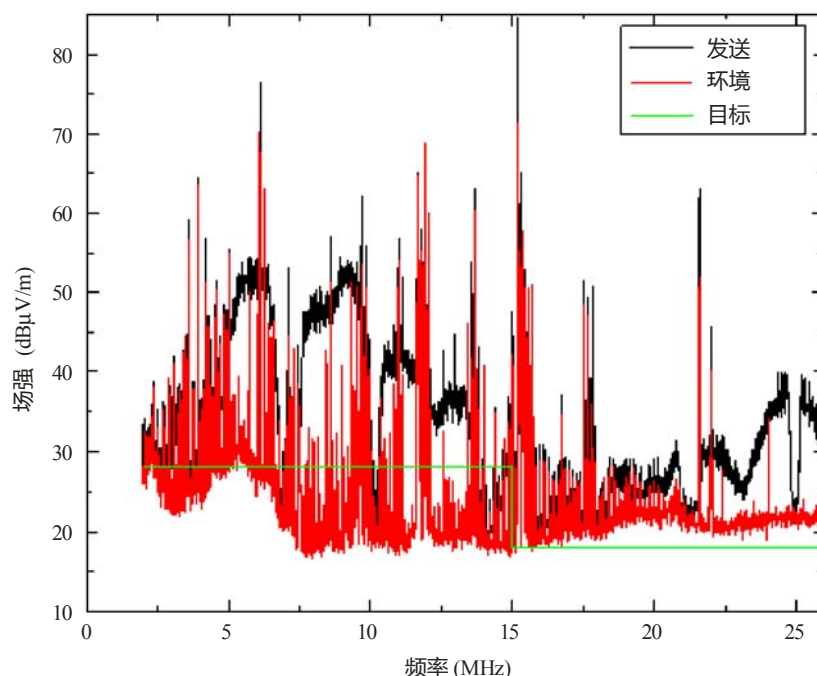
当PLT系统正在使用时，测量PLT骚扰的场强（“发送”），当PLT系统没有在使用时，测量环境噪声的场强（“环境”），测量结果如图11所示。在大部分HF频谱上，来自PLT系统的骚扰场强要比环境噪声电平大得多，达到55 dBμV/m (BW = 10 kHz)，这比环境噪声电平高出了30 dB。为了进行比较，在测量位置上由适用的国家规定设置的场强限值为28 dBμV/m（15 MHz以下）和18 dBμV/m（15 MHz以上）。测量得到的场强要大于设置的限

³ Kitagawa, M. 和Ohishi, M. [2008年9月] — 居住环境下来自室内宽带电力线通信的辐射电场和共模电流的测量，第8届有关电磁兼容性专题国际研讨会会刊（EMC欧洲2008），第433页至438页，德国，汉堡。

值，此外，在15 MHz以下并且PLT装置正在工作的情况下，测量得到的场强比实际测量得到的环境噪声电平高约10 dB。

图11

PLT系统产生的RF骚扰



SM.2269 报告-11

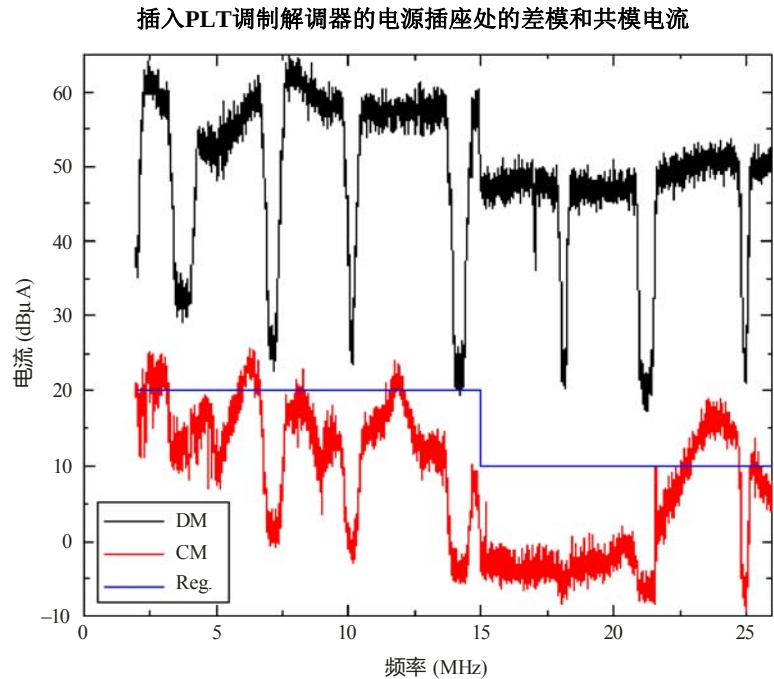
4.2 在电源插座处测量得到的RF电流³

为了定位这个PLT装置RF骚扰的来源，在馈入PLT信号的电源插座处测量共模（CM）和差模（DM）⁴ RF电流，测量结果如图11所示。

在图12中，CM电流（较低的曲线）在大部分HF频谱上满足容许的电流电平要求（15 MHz以下时为20 dBμA，15 MHz以上时为10 dBμA），DM电流在15 MHz以下时为60 dBμA，在15 MHz以上时为50 dBμA。DM电流比CM电流高40 dB，然而只规定DM电流比CM电流高16 dB。测量得到的DM电流与预期的DM电流之间有24 dB的差距，这能够解释测量得到的场强（55 dBμV/m）与目标电平（28 dBμV/m）之间存在着的27 dB差距中的大部分。

⁴ 关于电力线路上CM和DM RF电流产生机制的说明，见ITU-R SM.2158报告的第2章。

图12



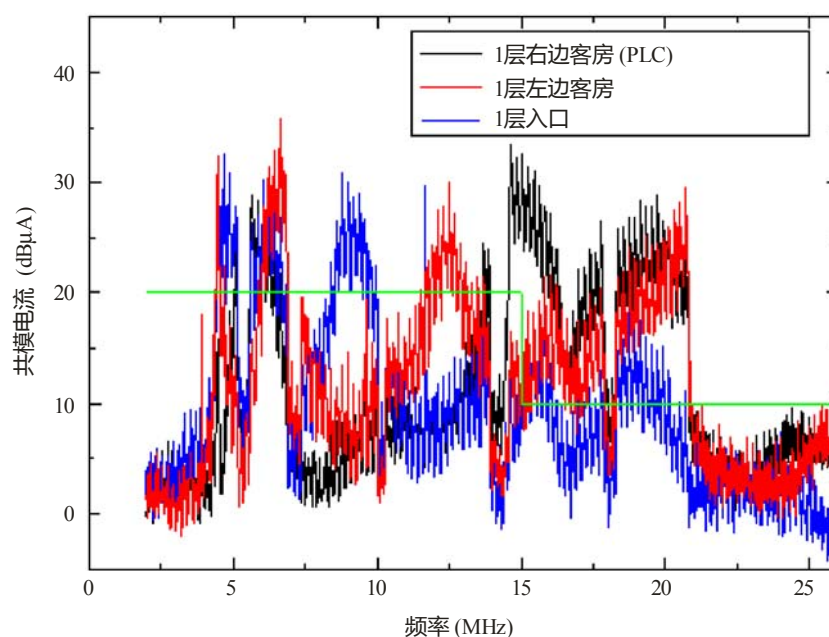
SM.2269 报告 -12

4.3 测量得到的沿着电力线路的CM电流³

沿着电力线的CM电流完全不同于在馈入PLT信号的电源插座处测量得到的CM电流，然而，测量沿着已安装的电力线路的CM电流很困难。通过给未使用的电源插座连接一条短（3 m）的电力电缆，就有可能测量在该未使用的电源插座附近流动的CM电流。不同电源插座处的CM电流测量结果如图13所示。未使用的电源插座附近的CM电流可能比注入PLT信号的电源插座处测量得到的CM电流高20 dB，可以看到该CM电流超过了CM电流限值10 dB以上，该CM电流为什么会超出目标限值的可能解释是DM电流远大于预期值。

图13

没有连接PLT调制解调器的电源插座处的共模电流（采用短延长电缆方法测量得到）



SM.2269 报告-13

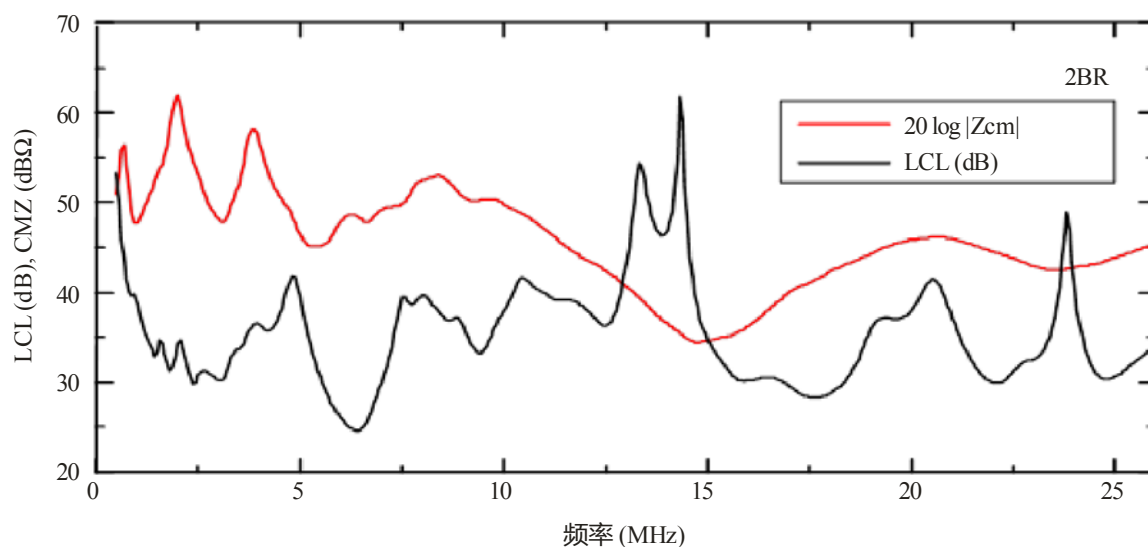
4.4 电源插座处测量得到的LCL

CM电流电平的限值是通过假设纵向转换损耗（LCL）等于或大于16 dB来设置的。当房屋电力线的LCL小于16 dB时（即更差的性能，通过DM电流到CM电流的显著转换），则可以预计CM电流将大于期望的限值，为了检验这种可能性，要对LCL进行测量。

测量结果如图14所示，可以看到最小的LCL为24 dB，该数值大于16 dB（即更好的性能），没有发现测量得到的LCL和测量得到的PLT骚扰场强之间存在负相关。

图14

在电源插座处测量得到的LCL和共模阻抗



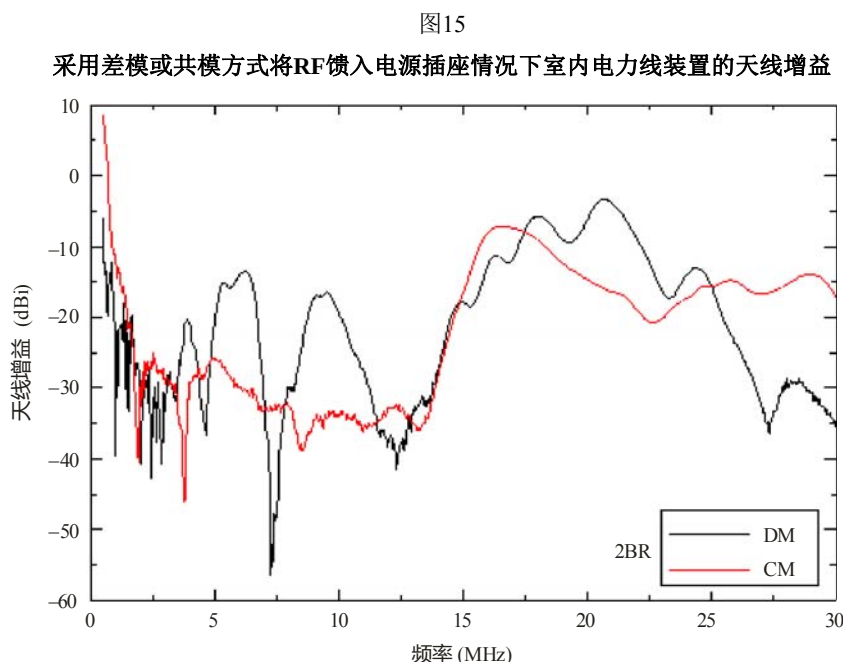
SM.2269 报告-14

4.5 室内PLT装置的等效天线增益⁵

比预期的建筑物屏蔽效应要小可以解释为什么测量得到的RF骚扰会大于预期的限值，此外，假设沿着电力线的CM电流量相同，则来自电力线的RF骚扰还取决于电力线路的几何结构，仅从诸如电源插座处测量得到的LCL之类的参量不可能提取这样的信息。

表示从PLT信号强度（PSD）到RF骚扰场强的总的转换因子的最直接、最可靠的参量是整个PLT装置的天线增益，正如注入PLT DM信号的电源插座的DM电流流入到建筑物外面的接收天线。这个数字包含了电力线的天线效应和建筑物的屏蔽效应，可通过使用LCL探测电路有选择性地激励注入点（电源插座）处的DM和CM；然后采用网络分析仪测量从选定模式的电源插座到距离房屋外墙10 m处的参考天线（无源环形）的透射比。

测量结果如图15所示，在大部分的较低HF频谱上，DM的天线增益要大于CM的天线增益。此外，DM天线增益和骚扰的场强呈正相关，这说明强的RF骚扰在6和9 MHz附近，此时房屋电力线的等效增益约为-15 dBi。在HF频谱的较高部分，DM和CM具有高达-10至-5 dBi的可比拟的天线增益。



SM.2269 报告 -15

⁵ Kitagawa, M. [2007年10月] — 室内电力线天线因子的原地测量，IEICE技术报告第107卷，EMCJ2007-54，第7页至12页（在日本）。