

中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z 37627.3—2019/CISPR/TR 18-3:2010

架空电力线路和高压设备的无线电 干扰特性 第3部分:减少无线电 噪声至最小程度的实施规程

Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage
equipment—Part 3: Code of practice for minimizing the generation of radio noise

(CISPR/TR 18-3:2010, IDT)

2019-06-04 发布

2020-01-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 架空电力线路及相关设备对控制无线电广播声音和电视接收干扰的实用设计	1
4.1 概述	1
4.2 导线电晕	1
4.3 金具电晕	2
4.4 绝缘子表面放电	2
4.4.1 洁净或轻度污染的绝缘子	2
4.4.2 重度污染的绝缘子	2
4.5 接触不良和换向作用差产生的火花和微火花	3
4.6 电力线路及相关设备运行时的缺陷	3
5 架空线路参考水平的预测方法	3
5.1 概述	3
5.2 本部分其他章条中所给出资料的相互关系	4
5.3 国际大电网会议(CIGRE)公式	4
5.4 80%水平的确定	5
5.5 结论	5
6 将因接触不良产生的无线电噪声减少到最低程度的预防和补救措施以及不良接触点的探测与定位	5
6.1 概述	5
6.2 预防和补救措施	5
6.3 不良接触点的探测与定位方法	7
7 多分裂导线(4分裂以上)和管状导线产生的无线电噪声场强预测公式	8
7.1 基本原则	8
7.2 多分裂导线产生的电晕无线电噪声场的计算	9
7.2.1 无线电噪声场强的计算过程	9
7.2.2 大雨条件下激发函数的计算	9
7.2.3 计算不同天气条件下激发函数的修正系数	9
7.2.4 无线电噪声场强的计算	10
7.3 大型管状导线的无线电噪声场强计算	10
8 图示	11
附录 A (资料性附录) 架空线路导线无线电噪声场强的预测公式	19
附录 B (资料性附录) 多分裂导线架空线路给定距离处的无线电噪声场强的预测分析程序	27
参考文献	32

前 言

GB/Z 37627《架空电力线路和高压设备的无线电干扰特性》目前包括以下部分：

——第1部分：现象描述；

——第3部分：减少无线电噪声至最小程度的实施规程。

本部分为GB/Z 37627的第3部分。

本部分按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用CISPR/TR 18-3:2010《架空电力线路和高压设备的无线电干扰特性 第3部分：减少无线电噪声至最小程度的实施规程》。

与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

——GB/T 4365—2003 电工术语 电磁兼容[IEC 60050(161):1990, IDT]

——GB/T 11604-2015 高压电气设备无线电干扰测试方法(IEC/TR CISPR 18-2:2010, MOD)

——GB/Z 37627.1—2019 架空电力线路和高压设备的无线电干扰特性 第1部分：现象描述 (CISPR/TR 18-1:2010, MOD)

本部分由全国无线电干扰标准化技术委员会(SAC/TC 79)提出并归口。

本部分起草单位：中国电力科学研究院有限公司、上海电器科学研究院、西安高压电器研究院有限责任公司、国家电网有限公司、中国合格评定国家认可中心。

本部分主要起草人：邬雄、李妮、刘媛、刘皓、陈迪、汪美顺、路遥、刘兴发、崔东、郝宇亮、张建功、张业茂、谢辉春、干喆渊、周兵。

架空电力线路和高压设备的无线电 干扰特性 第3部分:减少无线电 噪声至最小程度的实施规程

1 范围

GB/Z 37627 的本部分适用于可能会对无线电接收产生干扰的架空电力线路和高压设备无线电噪声,不包括电力线路载波信号产生的场。

涉及的频率范围为 0.15 MHz~300 MHz。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 60050-161 国际电工词汇(IEV) 第161章:电磁兼容[International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Chapter 161: Electromagnetic compatibility]

CISPR/TR 18-1:2010 架空电力线路和高压设备的无线电干扰特性 第1部分:现象描述(Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment—Part 1: Description of phenomena)

CISPR/TR 18-2:2010 架空电力线路和高压设备的无线电干扰特性 第2部分:测量方法和限值确定程序(Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment — Part 2: Methods of measurement and procedure for determining limits)

ISO/IEC Guide 99 国际计量学词汇 基础和通用概念及相关术语(VIM)[International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms (VIM)]

注:资料性参考文件列在参考文献中。

3 术语和定义

IEC 60050-161 和 ISO/IEC Guide 99 界定的术语和定义适用于本文件。

4 架空电力线路及相关设备对控制无线电广播声音和电视接收干扰的实用设计

4.1 概述

本章为架空电力线路及相关设备的设计、施工和运行提供技术指导,以使本部分所述各类无线电噪声保持在可接受的水平以内。

4.2 导线电晕

在线路设计中,宜考虑其几何参数,以保证由导线电晕产生的无线电噪声不超过规定的可接受水平,其中最重要的参数是导线的直径和每相导线分裂数,其他诸如相间距离、导线对地高度或分裂导线

的间距,这些参数只有较小的影响,实际上它们通常取决于机械和绝缘上的要求。

定量确定导线电晕的无线电噪声水平的规则,在 CISPR/TR 18-1:2010 中的 4.3 和本部分第 7 章中讨论,这些规则通常对绞线和光滑导线均适用,因为一般说来,绞线表面虽然不光滑,但实际上并不改变噪声水平,尤其在导线潮湿或淋雨时。另一方面,在有刮痕、绞线断股和如污秽之类表面沉积物或者昆虫依附在表面时,由于局部电位梯度高,可引起严重的局部电晕放电,这便会大大增加线路的噪声水平。鉴于这些原因,在施工过程中需要避免损坏导线表面,在运输和安装中也要小心对待导线,并且在放线过程中采用适当技术,避免导线触及地面或其他物体。为保护导线,在运输和拉线时,应避免导线外部沾上油污;当导线通电时,温度会上升,特别在温度较高的天气,会导致油污蒸发而伴随着产生污秽物,引起局部产生高电位梯度,从而产生无线电噪声。在导线的钢芯或内层涂上防锈油脂时,应选择一种即使在最高温度下也不会渗出表面的油脂。

4.3 金具电晕

由金具(如悬垂线夹、终端线夹、支架、均压环、角状物和间隔棒等)的电晕引起的无线电噪声,是能够控制的。为避免出现高电位梯度点,可在设计阶段确定合理的外形和尺寸。所有的边、角都应挫圆,螺栓头也应打圆或者屏蔽,并且避免存在尖端和凸出物。金具上的保护电镀层光滑也很重要,特别是在出现最大电位梯度的点。

为保护绝缘子串不受电弧损坏和改善沿绝缘子串电压分布,有时要安装保护装置。这些保护装置有利于降低导线线夹引起的无线电噪声水平,因为它们屏蔽了线夹上的尖端或凸出物。选择保护装置的形状和尺寸时,应保证本身不产生无线电噪声。例如,简单的角形保护装置,应避免应用在 150 kV 以上电压;均压环的管子直径应足够大,以保证雨天不产生电晕。

然而,现有的经验似乎表明,要设计适合雨天的均压环是相当困难的,即使多管均压环也一样。在这种情况下,可能需要对支架布置进行特殊设计,使得分裂导线直接屏蔽绝缘子串,并用分裂导线子导线上的合适装置保护绝缘子串不被电弧烧坏。

同导线一样,金具在其制造、运输、施工和维修中始终都应十分小心,使其免受损坏。

4.4 绝缘子表面放电

4.4.1 洁净或轻度污染的绝缘子

这些绝缘子在干燥天气条件下产生的无线电噪声可采用下述措施予以控制:

- 使用设计合理的绝缘子,特别是绝缘子的几何形状以及关键部位材料的特性;
- 使用在设计上改善绝缘子表面或沿绝缘子串电压分布的保护装置。

例如,设计绝缘子时,使用导电釉可改善绝缘子表面电位梯度的分布;在保护装置设计中,金属环应尽可能靠近绝缘子,或者至少靠近绝缘子串线路端的两、三个绝缘子,这样可大大改善绝缘子表面或沿绝缘子串的电压分布并降低无线电噪声。但是,金属环应与其他要求一致,如绝缘子耐压、绝缘子电弧保护、线夹的屏蔽等(见 4.3)。

在潮湿天气、雾天或雨天时所产生的无线电噪声一般比干燥天气时产生的无线电噪声更难控制。然而,在线路设计中很难有严格的修正系数,因为水滴使绝缘子增加无线电噪声通常没有导线上那样严重。

4.4.2 重度污染的绝缘子

在干燥条件下,除了引起洁净绝缘子上的电晕现象外,其他由于污物沉积而造成表面不光滑,也能发生电晕现象,如 CISPR/TR 18-1:2010 中的 6.1 所述。在这种情况下,即使各部件经过周密设计,也无明显效果。然而,用于改善绝缘子或沿绝缘子串电压分布的控制装置,可能会大大改善无线电噪声

特性。

当受污染绝缘子表面潮湿时,绝缘子表面泄露电流引起干燥带上的电火花产生无线电噪声,这一点在 CISPR/TR 18-1:2010 中的 6.1 中已阐述。这种噪声有时含有很高的频率分量,可能影响声音和电视的接收,且难以控制。唯一切实可行的改善方法是限制受污染绝缘子表面的泄露电流。可通过以下方法实现:

- a) 减少绝缘子上电压应力——例如,采用比正常耐电性能强的较大爬距绝缘子。
- b) 利用特殊类型的绝缘子,如有机材料制成的绝缘子、或涂有半导体釉的绝缘子,或设计成具有更大爬距的绝缘子,如耐雾绝缘子、特殊形状绝缘子等。
- c) 在绝缘子上涂上硅酮油脂。

4.5 接触不良和换向作用差产生的火花和微火花

消除或减小这种形式的无线电噪声的补救措施分别在第 5 章和 CISPR/TR 18-1:2010 中的 8.4 叙述。

4.6 电力线路及相关设备运行时的缺陷

尽管在电力线路和变电站的设计、施工中采取了所有可能的预防措施,以使无线电噪声保持在可接受的允许值以内,但是在运行中偶尔还会出现各种缺陷,而产生不可容许的噪声。这种噪声可能是由于导线断股、线夹或绝缘子的损坏,或者导线和绝缘子上污秽沉积等引起。总之,不论这些缺陷是否成为噪声源,都应予以消除,以便电力系统安全运行。实际上,由于这样的缺陷有时会产生噪声,可能要求对电力系统故障隐患进行探测与定位。

探测这些反常的噪声源可采用各种仪器,例如无线电干扰测量仪、电视接收机或超声和光学探测器。当噪声影响电视的接收时经常更容易定位,因为在很高频率下,沿线的纵向衰减很大。而当只有低频和中频的无线电广播受到影响时,噪声源的定位可能需要配用光学、超声或紫外线的仪器来记录无线电噪声场的纵向衰减,如第 5 章中所论述的那样。

5 架空线路参考水平的预测方法

5.1 概述

本部分旨在为从事现场工作的工程师提供分析无线电干扰问题所需的理论和实践的基本知识。有关技术方面的问题已在 CISPR/TR 18-1:2010 中做了阐述,本章将对很多方面的问题用简明的方式进行理论和实践上的探讨。

线路的参考水平是以 500 kHz 为基准参考频率,在距线路最近导线直接距离 20 m 处的无线电噪声场强。如果正常线路的导线表面空气中的电位梯度约大于 12 kV/cm~14 kV/cm(取决于导线直径),线路的噪声特性则取决于导线的特性。对于一条拟建的线路,其每相的导线数和导线直径经常取决于所要求的通流能力或经济上的考虑,而参考水平的预测通常要求特定的气候条件,如果一条线路设计用的导线表面电位梯度高,那么线路一旦建成,就很难降低其噪声水平了。

CISPR/TR 18-1:2010 附录 B 中的图 B.14 给出了对于测量频率不是 500 kHz 时的无线电噪声水平的修正关系。

如果线路导线表面空气中的电位梯度约小于 12 kV/cm,无线电噪声水平通常取决于绝缘子和金具。在这种情况下,线路的无线电噪声特性本来就是好的,而且最好选择相应特性的绝缘子和金具,以保持这种良好的特性。大多数预测方法都与导线噪声有关,而不适用于导线表面电位梯度低的线路。目前,还没有一种预测方法可用于松动或不良接触处火花源产生的噪声。

5.2 本部分其他章条中所给出资料的相互关系

本章包括有关线路的无线电噪声电压和沿线路方向在一定横向或直接距离产生的地面无线电噪声场强的相互关系的信息：

a) 导线噪声的预测方法

CISPR/TR 18-1:2010 中的 5.3 预测方法的综述,包括解析法或半经验法,和经验法或比较法两方面。解析法源于短的样本导线在电晕笼中的测量结果并包括进行相当复杂的分析。可对样本导线的任何表面状况进行试验,并按 CISPR/TR 18-2:2010 中的 4.5 给出的电路进行无线电噪声电压的测量。然而,由于导线电晕引起的参考水平的可靠预测只能根据潮湿试验来进行,因为在这种情况下,每单位长度导线上单个电晕源的数量足以满足统计方法所需的样本数。对于直流线路,则应参见 CISPR/TR 18-1:2010 中的 8.2 来计算噪声水平。

CISPR/TR 18-1:2010 中的 5.3 所提出的简单比较法公式是以在类似设计的现有线路上进行的无线电噪声场强的测量为基础的。这些公式考虑了参考线路和拟建线路之间的任何差别的影响,比如表面电位梯度或导线直径的差别,如果参考线路和拟建线路的设计相似,并且运行条件(如空气污染程度等)也相似,那么就可相当准确地预测拟建线路所期望的相当准确的导线电晕引起的噪声参考水平。天气的影响也通过在各种天气情况下测量参考线路而确定。

CISPR/TR 18-1:2010 中的 5.4 和附录 B 中列出了对于某些设计单回架空线路中由导线电晕产生的无线电噪声场强的分布图的目录。当线路导线表面空气中的电位梯度值足以产生无线电噪声时,这些分布图才是正确的,分布图给出了大雨和平均好天气条件下测量频率为 500 kHz 的场强值;大雨条件下的场强高出 17 dB~25 dB。这些分布图表明了距离线路 150 m 以内的场强随距离的衰减情况。

b) 绝缘子和/或金具噪声的预测方法

CISPR/TR 18-1:2010 中的 6.2 给出了按照 CISPR/TR 18-2:2010 中的 4.5 说明的程序测量时,线路附近或部件产生的无线电噪声水平与参考场强水平之间的关系。这个关系适用于电力线路有单个噪声源(例如一个击穿的绝缘子),或者沿线有多个分布均匀的噪声源的情况。这种包括半经验公式在内的方法,对拟建线路运行在较低的表面电位梯度下,和需要对线路绝缘子的参考水平进行预测时特别有用,绝缘子按照 CISPR/TR 18-2:2010 中的 4.5 的程序进行测量时,需在清洁和干燥条件下进行,因这是常规条件,但是,测量程序并不限于测量清洁干燥绝缘子,特别污秽的绝缘子样品不论潮湿和干燥也可进行测试,将其测试结果填入公式来预测拟建设线路的参考水平。

c) 导体、绝缘子和/或金具的综合噪声的测量方法

CISPR/TR 18-1:2010 中的 5.2 给出了有关应用测试线路的资料。当新设计的线路与现有线路条件不相关时,有时候要通过在较短的试验线段上研究噪声特性。这种用测试线路的研究方法对目前正在计划实施阶段、比迄今为止运行电压都高的新系统特别有用。测试线路的无线电噪声特性的监测是在线路运行中各种天气和大气条件下进行的,以便对拟建线路在投入运行后会遇到的情况进行特性评估。这种评估也包括绝缘子受污染的影响。其他的重要数据,如电晕损耗、可听噪声特性等,也能同时从测试线路中获得。

CISPR/TR 18-2:2010 中的 5.4 提供了一种确定参考水平的方法,这一参考水平在 80% 的时间中对给定的广播信号强度通过 80% 置信度的保护。

5.3 国际大电网会议(CIGRE)公式

目前已经得出一个简单明了的公式来预测线路中导线的无线电噪声场的水平。这一经验公式,给出了老化导线在好天气下,距离最近导线 20 m 处,测量频率为 500 kHz 时最可能出现的噪声水平。该公式是以线路在 200 kV~765 kV 之间运行,最大电位梯度为 12 kV/cm~20 kV/cm 时导出的。严格地说,公式给出的是线路的单相导线或单根导线产生的噪声水平,并且可通过求和公式考虑其他导线的

影响。然而,从以上范围中的一些线路设计中发现,如果仅考虑三相线路中在测量点产生的最高噪声的导线,那么只引起小的误差,而通常这是对距离测量点最近的导线,但并非所有情况都如此。

公式如下:

$$E = 3.5g_{\max} + 12r - 30$$

式中:

E ——距实际线路中最近导体直接距离 $D_0 = 20\text{m}$ 处的无线电噪声场强,单位为微伏每米分贝 $[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})]$;

g_{\max} ——导线表面电位梯度最大值,单位为千伏每厘米(kV/cm)(有效值);

r ——导线或分裂子导线的半径,单位为厘米(cm)。

5.4 80%水平的确定

线路的80%水平可通过计算预测到。或者,如果线路是现有的,80%水平可通过高置信度噪声的测量而得,确定80%水平的方法如下:

- 1) 对于一条已存在的线路,具有高置信度的80%水平可从一年内测得的全天候分布曲线来确定。
- 2) 如果全天候分布曲线得不到,或对拟建线路情况不适用,则可利用设计相似的线路在相似的天气和相似的污染环境下测量的结果。
- 3) 从 CISPR/TR 18-1:2010 中的 4.3.4 提到的数据可看到,平均来说,线路的80%水平比50%水平大10 dB,因此,如果已知线路的50%水平,则可估算出80%水平。
- 4) 从上述 5.3 的简单公式中,可根据天气情况,对好天气的噪声水平增加 5 dB~15 dB,就可估算出80%水平。

5.5 结论

针对拟建的特定线路所用的专门预测方法,取决于导线的电晕,还是绝缘子和/或金具产生的导线电晕或噪声占主要地位,即导线是否运行在表面电位梯度大于约 $14 \text{ kV}/\text{cm}$ 或小于 $12 \text{ kV}/\text{cm}$ 。对于电位梯度值处在这两个值之间的线路,导线和绝缘子都会向拟建线路贡献噪声水平。

5.2a)中的简单比较公式和无线电噪声场强分布图的目录以及 5.3 中 CIGRE 公式,使用都很方便。只要使用条件在其本身的限制内,则可得出拟建线路中导线预期的准确参考水平。应记住,由于无线电噪声的变化特点和其受天气条件、大气条件、污染等影响,所以要测量具有高精度和重现性的噪声参考水平通常是困难的。

5.2b)提供的关于绝缘子和/或金具产生噪声的预测方法至今还未实际用于特殊污秽试验的绝缘子,但是这种方法可允许用于这种情况。如果某条线路能参考 5.2 c)中所述方法进行试验,而且又有时间进行试验的话,那么可用获得拟建线路导线、绝缘子和金具的噪声参考水平,且具有良好的精度。

6 将因接触不良产生的无线电噪声减少到最低程度的预防和补救措施以及不良接触点的探测与定位

6.1 概述

在接触不良(如松动或不完全接触)的部位的火花产生的无线电噪声主要发生在干燥天气,因为在潮湿天气比较小的间隙通常由于水滴而连通。

6.2 预防和补救措施

在安装高压设备时,下列两条很重要:

- 1) 保证所有的固定螺栓都可靠拧紧;

2) 导体元件尽可能接地或连接至导线电位。

对于配电线路,相邻的金属表面连接很重要,但不要求接地或连接导线电位来抑制火花放电。如果是非平面连接(如用销钉和 U 型槽、或用球头和碗槽作为绝缘子串的连接),那么相邻的导体部分应是良好的“金属-金属”连接,整个装配应很好地保持与设备的其他金属部分绝缘。应记住,即使是新设备,电镀的金属部件也可能覆盖碳酸锌锈蚀层。当表面锈蚀,出现多余的氧化物和硫化物时,那么金属的不完全接触可能导致间歇类型的放电,在悬挂的绝缘子机械负荷不足时会发生这种现象。

下列的预防和补救措施被认为是有效的:

a) 导电油脂和胶质物

一种快速而经济的方法是应用导电油脂于绝缘子的碗槽或 U 型槽区域。但这仅是一种临时性的处理,需要日后在使用油脂。使用含铜胶质物,取代导电油脂,可获得较持久的效果,但需注意油脂和胶质物不能流到绝缘的表面上。

b) 连接刷

应用不锈钢丝制的连接刷,是一种保持 3~5 年的临时措施,它提供了在销钉与 U 型槽、球头与碗槽处的“金属-金属”的连接。

c) 连接线夹

当应用针式绝缘子与 U 型绝缘子时,连接线夹很容易安装在销钉与 U 型槽部位,尤其是在导线线夹与线路端绝缘子的连接处使用更为重要。有几种连接线夹适合于插在球头与碗槽之间,可保持足够的压力以破坏氧化层。

d) 永久性连接

可能获得最好效果的方法是,在绝缘子串的每个绝缘子的金属连接部分使用永久性柔性连接,包括接地端的绝缘子与横臂之间以及线路绝缘子与导线线夹之间的连接。连接件可以是一束不锈钢线,或是铜芯电缆,连接方式可以是焊接,或者是用螺栓固定。铜芯电缆应有塑料层覆盖,以防铜芯电缆的断股线绞成一团。

e) 用作增加机械荷载不足的金属压块

为保证相邻两个绝缘子的金属帽和脚之间接触良好,绝缘子串应增加金属压块。为防止电晕放电,金属压块边角应挫圆。

f) 弹簧垫圈和塑料垫圈

如果杆塔采用木制结构,那么使用弹簧垫圈或塑料垫圈具有某些优点。弹簧垫圈能防止由于木质皱缩而引起的电线杆和横臂上的金属构件松弛,醋酸盐或尼龙塑料垫圈也可加强对螺母的紧固,在这些使用防振型螺母或塑料垫圈的地方,应注意保证金属部件之间没有绝缘间隙。这样的垫圈一般仅用于螺母和木杆或横臂之间。

g) 单个绝缘子

使用单个绝缘子的优点在于能进一步减少无线电噪声源。

h) 涂有导电釉的针式绝缘子

使用针式绝缘子时,在绝缘子顶部支承导线的槽表面、边槽的箍线和扎线处可能出现火花。这个问题可通过导电涂料或绝缘子表面与导体连接处的金属化处理来解决。这些金属化介质只有在绝缘子制造过程中与釉一起使用才有效。对于针式绝缘子,如果针式螺杆直接插入瓷瓶中的螺孔,那么瓷瓶的螺孔应用导电涂料处理。虽然最好的解决方法是购买在制造中螺孔就已上了釉的绝缘子,但作为另一种方式,螺杆可与螺孔用水泥粘住。

如果使用聚氯乙烯(PVC)作绝缘的导线,那么在支撑绝缘子上可能产生局部放电。这些放电可通过用半导体带包在聚氯乙烯上来避免。对于 11 kV 线路,包扎的半导体带应在绝缘子两边各伸延 600 mm。

i) 塑料紧固件和绝缘子 U 型钉

使用塑料紧固件或绝缘 U 型钉把地线固定在木质电杆上,可避免地线与它的紧固件之间产生火花,尤其是当紧固件松动或出现锈蚀时。

6.3 不良接触点的探测与定位方法

在电力线路或变电站中出现不良接触时,探测并准确确定出噪声源的位置比测量由此产生的场强更为重要。下面将叙述探测与确定不良接触位置的实际方法,测量和观察一般应在好天气下进行。

由于高压电力线路及有关设备常常是不同射频噪声场的根源,所以有必要在受干扰接收机上开始探测无线电噪声源。探测的第一步是用扬声器或耳机以及示波器或电视接收机获得无线电噪声的音频信息和/或视频信号。

探测由不良接触产生的无线电噪声源时,最好在可接收到的最高频率下观察噪声,因为它沿线衰减比较快。用于探测噪声源的仪器应能覆盖整个噪声频率范围,但这样的仪器很少。几乎没有专门设计的用于探测噪声源位置的仪器,因此可能有必要改进商用设备来适用这种需要。

以下设备可有效地探测出不良接触点的位置:

- a) 可调频率至少是 500 kHz~18 MHz 的(调幅)接收机。
- b) 甚高频(VHF)场强测量设备,配有一根二元宽带天线和一个 VHF 前置放大器。音频输出应充分放大,以馈送扬声器和示波器。
- c) 配有遮光罩及扫描频率约 500 Hz 时,可供全日光下使用的亮度足够强的示波器。
- d) 超高频(UHF)场强测量仪,配有两根可变换的八木天线,一根用于 500 MHz,另一根用于 800 MHz。扬声器需要中等水平的音频输出。需要射频(RF)前置放大,最好有中频(IF)增益控制。整个装置应能够由一个人携带。
- e) 没有自动增益控制的小型射频探测仪,其频率范围从中频(MF)到 VHF。
- f) 装在金属盒内、没有手动或自动增益控制的小型调幅广播无线电接收机。接收机的天线可以是拉杆式的,能够改变 RF 灵敏度,即可调 RF 增益;或更好地是安装在金属盒内的一个长度相当的槽中的铁氧体棒。金属盒安置在长若干米、直径约 3 cm~6 cm 绝缘管的一端。接收机扬声器输出直接进入绝缘管,绝缘管另一端放置传声器以接收噪声信号。传声器的输出经过放大器输入耳机或扬声器。这种布置方式允许接收机放在靠近噪声源处;只要小心使用,甚至可用在高压设备产生无线电噪声的地方。

绝缘管的绝缘性能及其长度应能确保满足系统电压的安全规定。

- g) 带有抛物面反射器的灵敏超声探测仪,在噪声源多而集中的地方(例如在变电站)它是一种特别有效的仪器。但它的使用局限在好天气条件下,应记住,这种仪器对电晕源也是灵敏的。

宜按照下列程序,对由接触不良产生的一个或多个无线电噪声源进行定位:

- i) 利用探测设备,在受干扰的接收机上通过视觉和/或听觉分辨噪声信号,并对 RF 频谱的有关部分扫描以确定噪声频率范围。
- ii) 如果有宽频带噪声出现,利用可能的最高频率进行跟踪,沿电力线路移动时,如果在越来越高的频率检测到噪声,那么就趋近于噪声源了,在噪声源的附近区域,应在广播频带中的大多数频率都检测到噪声信号,当较高的频率开始减弱时,说明噪声源已过。由于驻波的原因,在沿线某一位置和某个频率下,会出现零值。对于木杆线路,使用大锤是有效的。如果在杆脚用锤子敲击,在这根木杆上因不良接触产生的噪声就会急剧增加或暂时消失。这就有助于确定带有噪声源电杆。

进一步确定不良触点部位的方法(尤其在有若干连接点的变电站)是直接把细小的水流依次喷射到每个有不良接触疑点的金属接头上。为保证足够的绝缘,把盛放少量水的塑料容器固定在绝缘材料制成的长棒或长杆上。两根管子伸入容器中,一根管子的端头接入喷嘴,用来喷射细水流,另一根则经过汽阀从地上输送压缩空气,操作者站在地面上通过压缩空气控制水流。当找出不良接触点后,常用与上

述相似的装置,向不良接触的接头注入适当浓度的油脂。

- iii) 如果探测到的是窄频带的噪声,那么三角测量法将是最好的判断噪声源的方法。然而,尽管是在噪声源的位置,火花噪声也要在很宽的频带(最高达 100 MHz)进行探测。窄带噪声可能由间隙型放电引起,在配件或附件中产生共振。
- iv) 如果存在若干个噪声信号,那么可能有必要用示波器对噪声源加以区别,确定噪声源是由于接触不良(产生火花)而引起,还是电晕产生。以下信息可能有所帮助:
 - a) 示波器或电视通常显示出清晰图像;
 - b) 好天气时高于 30 MHz 的噪声是由火花放电引起的;
 - c) 如果只是在好天气产生噪声,那么可能是火花放电所致;
 - d) 线路上电压约低于 70 kV 时火花放电产生的噪声明显多于电晕噪声。
- v) 如果探测表明噪声源是在变电站中,那么应使用如 e)所述的射频探测仪或小型便携式调幅无线电接收机(不带自动增益控制)。接收机应依次放置在各个电站设施的控制线和连接线附近,这样可将这些线作为噪声源的天线。
- vi) 关于电力线路,当判断出噪声来自杆塔时,采用 d)所述测量仪器则可进一步定位。应利用天线的水平和垂直的极化来检测杆塔,以确定杆塔构架是否含有噪声源。如果没有探测到噪声场,那么就应在测量频率上下调谐几十兆赫兹,作进一步探查(在特定的频率下可能会出现零值)。
- vii) 准确探测噪声源的最后一步应使用 f)所述测量仪器进行。这有助于仔细检查杆塔或变电站的绝缘子,以验证其不存在噪声。
- viii) 低水平声学噪声通常伴随着火花放电和间隙放电而产生,一台具有抛物面反射器的灵敏超声探测仪,波束宽度窄,常可有效地探测噪声源的位置。

7 多分裂导线(4 分裂以上)和管状导线产生的无线电噪声场强预测公式

7.1 基本原则

5.3 列出了输电线路导线预期产生的无线电噪声场强的简单预测公式。基于经验,这个公式给出了已经老化的导线在好天气情况下,距离最近导线直接距离 20 m、测量频率 500 kHz 时最可能得到的水平。公式是从运行电压 200 kV~765 kV,表面电位梯度从 12 kV/cm~20 kV/cm 的线路附近进行的测量结果推导出来的。测量结果是从单根导线到 4 分裂导线的输电线路得到的。

多分裂导线产生的无线电噪声场强的预测方法,是从试验线段和电晕笼的测量数据的基础上,电压大于或等于 1 000 kV 架空线路工程推导得到的。它们是基于所谓的激发函数法。

激发函数法是基于注入多相导线电晕电流,不仅依赖于其内部的电晕特性(电位梯度、子导线直径等),而且也依赖于多导体系统的子电容和互电容。无线电噪声电流和导体内部的电晕特性(叫做激发函数 Γ),通过下列的形式相关联:

$$|I| = |C| \times |\Gamma| / (2\pi\epsilon_0)$$

式中:

$|I|$ 和 $|\Gamma|$ ——导体的无线电噪声相电流和激发函数;

$|C|$ ——电容矩阵。

在已知电容的试验结构中测量无线电噪声电流(电晕笼或者试验线段),可确定激发函数。

用这种方法的另一个很重要的优点是,在电晕笼中测量的无线电噪声电流,可确定外部条件可控情况下的激发函数值(对应于大雨条件下的人工降雨)。并且,对于不同的导线表面电位梯度,能给出稳定、可重现的结果。

基于激发函数概念的无线电噪声预测方法,更适用于电压较高的系统(电压等于或高于 1 000 kV)。

这种情况下电晕通常更加起决定性作用,并且计算结果更加准确。这个领域,不同的国家进行了广泛的研究:加拿大(IREQ),韩国(765 kV 项目),意大利(1 000 kV 项目),日本(CRIEPI),美国(GE/EPRI-UHV 项目,AEP/ASEA,BPA),前苏联(1 200 kV 项目),这些调查研究主要考虑多分裂导线的情况,本部分中给出的预测公式是对大量的试验结果进行对比和推理结果。

对于管状导线,在后面用类似的手段,得到本部分中给出的激发函数预测方法。在这个领域获得的经验远少于多分裂导线,因此本部分中提供的信息应仅用作导则。

这些研究,是为了有可能应用于电压等级等于或高于 1 000 kV 的架空线路,但是其结果也可应用于高压变电站的刚性管母线。在这种情况下,与变电站连接的线路的注入电流引入的场,是很重要的(见 CISPR/TR 18-2:2010 中的 5.7)。

7.2 多分裂导线产生的电晕无线电噪声场的计算

7.2.1 无线电噪声场强的计算过程

在对参考文献[6-13]中推荐的不同方法比较分析结果的基础上,推荐用下列程序,来计算距输电线路(已老化的对称分裂导线)给定距离的无线电噪声场强:

- 通过半经验公式,计算大雨条件下每一相的激发函数(见 7.2.2);
- 应用修正系数来获得其他天气条件下激发函数(见 7.2.3);
- 通过基于模传播理论完整的方法,或者简化的方法,确定无线电噪声场强分布(见 7.2.4)。

7.2.2 大雨条件下激发函数的计算

推荐下列公式用来计算大雨条件下的激发函数,单位是 $\text{dB}(\mu\text{A}/\text{m}^{\frac{1}{2}})$:

$$\Gamma_{\text{雨}} = 70 - 585/g + 35\log(d) - 10\log(n)$$

式中:

- g ——单根子导线最大电位梯度的平均值,单位为千伏每厘米(kV/cm);
- d ——子导线直径,单位为厘米(cm);
- n ——分裂导线的子导线数。

在线路的导线的子导线分裂间距 s 和子导线直径 d 的比值大于 10~15 的情况下,这个公式给出满意的结果。在比较小的 s/d 比值下,尤其是分裂数大于 10 的情况下,实际的激发函数被证实可能比计算值要高的多。

注: CIGRE WG 36.01 对不同的激发函数的预测公式进行了对比^[6]。本条中推荐的公式,给出了该值的上包络,这个值亦可用其他公式计算得出,因此给出了激发函数的保守计算。因此,这个公式应仅用于初步设计,以便与不同线路设计之间的对比。多分裂导线线路的设计要求对激发函数进行更为准确的计算,该计算需通过试验线段或电晕笼测量。

7.2.3 计算不同天气条件下激发函数的修正系数

在其他的天气条件下(小雨、湿导线、好天气),不同的试验工作者应用不同的方法:有的给出了结构上类似于大雨条件下激发函数的公式,但系数不同;有些提出了用于大雨水平的修正系数,其为常数或者取决于导线(尤其是新的或者已老化的导线)电位梯度、分裂结构和表面状况。

作为导则,如果没有通过试验获取更准确信息,可用图 1 中给出的修正系数,用大雨条件下的激发函数来获得小雨 50% 值或者好天气 50% 值。

如果要求 80% 全天候的激发函数值 $\Gamma_{80\%}$ 应用 CISPR/TR 18-2:2010 给出的限值,那么不同天气条件(好天气、雨天、坏天气等)的百分数及各种天气下无线电噪声的统计分布数据是必需的。CISPR/TR 18-1:2010 中的 4.3.4 表明了各种统计分布之间的相互关系。如粗略计算, $\Gamma_{80\%}$ 值可通过大

雨值减去10 dB~15 dB 得到。

7.2.4 无线电噪声场强的计算

7.2.4.1 概述

距三相导线给定距离的无线电噪声场强的计算,从每相的激发函数开始,通过基于模传播分析的解析法来实现。已开发出若干程序,用于这个计算。这些程序还考虑到了线路的不连续性(结构的改变、变电站的中继连接等)。用于长线路的简单解析法参见附录 B。

为了允许用一种快速计算无线电噪声场强分布的方法来替代解析法,可用下面给出的可接受的近似方法。

7.2.4.2 架空线路无线电噪声场的快速计算

距线路给定距离下无线电噪声场强的计算,是通过应用于激发函数一个“场修正系数”,来获得一条给定频率、给定土壤电阻率的基本设计线路的无线电噪声场强。待计算线路的无线电噪声场,通过考虑实际线路与基本实例之间差别后的其他修正系数来计算。

计算由 2 步实现。

第 1 步

具有基础参数和基础条件(土壤电阻率=100 $\Omega \cdot m$, 频率=0.5 MHz)的线路的无线电噪声断面,是通过给激发函数加一个“场系数”来计算的。三种基本相导线布置方式(水平、三角和倒三角)的场系数在图 2、图 3 和图 4 中给出。

第 2 步

考虑的实际线路的无线电噪声场强,是通过基本情况下的无线电噪声场强加修正系数来计算的。下面这些参数的修正系数在图 5、图 6 和图 7 中给出:

- ρ 土壤电阻率;
- f 频率;
- h 对地最小高度;
- S 相间距离;
- d 子导线直径;
- n 子导线数。

注:只考虑边相导线不会过度地影响这种简化了的方法。假定对于所有布置方式,中相导线和边相导线的激发函数的差值是一个常数;这个假定没有被普遍验证,但是带来的偏差不会大于 1 dB~2 dB。考虑激发函数的平均值可提高精度。

7.3 大型管状导线的无线电噪声场强计算

宜遵循类似于多分裂导线情况下的流程(见 7.2.1):每一相大雨下的激发函数通过半经验公式来计算,用修正系数来获得其他天气分类下的激发函数。

大雨条件下,推荐下面的公式来计算激发函数,单位为 $\text{dB}(\mu\text{A}/\text{m}^{\frac{1}{2}})$

$$\Gamma_{\text{b-r}} = -121 + 120 \log(g) + 40 \log(d)$$

式中:

- g ——导线最大电位梯度,单位为千伏每厘米(kV/cm);
- d ——导线直径,单位为厘米(cm)。

考虑到用修正系数来获得其他天气类型下的激发函数值,在没有获得更进一步的经验之前,下面的提示可能是有用的:

——通过图 8 所示的修正系数,可把小雨情况下的激发函数值和大雨情况下的联系起来,见图 8,图中管状导线直径为 40 cm。对于其他直径的管状导线,可预料与分裂导线一样,当直径增加时,修正系数增加。

——因为大型管状导体表面电位梯度小,在好天气下,激发函数值是微不足道的。因此,激发函数 80%全天候值很大程度上取决于天气状况。在适中的气候条件下,80%值可通过对大雨值用一个修正系数得到,这个修正系数比多分裂导线的要大。在这种情况下,没有更进一步的可用资料之前,宜取 15 dB~20 dB。

考虑到表面状况,下列的补充信息是可用的。

管状导线比分裂导线更易于积灰,积灰可能足以引起激发函数的变化。试验表明,湿导线情况下,激发函数不会随污染物的影响而变化。在干燥的情况下,导线表面上固体灰尘的出现,可能使无线电噪声增加到相同导线在雨天、最高电位梯度情况下的水平,特别是对于小直径的导线。

本条给出的公式对母线和线路导线都适用。

在母线情况下,单位长度无线电噪声电流层 I_0 可由激发函数 Γ ,通过管母系统的电容矩阵得到(根据附录 B 的第一个公式)。由 I_0 ,可获得管母总的注入电流 I_1 。连接在变电站的 n 条线路的注入的电晕电流 I ,可通过下面的关系式得到(见 CISPR/TR 18-2:2010 中的 5.7.3):

$$I = I_1/n$$

这样,根据 CISPR/TR 18-2:2010 中的 5.7.4 中所示的条件,可计算线路导线的无线电噪声分布。

8 图示

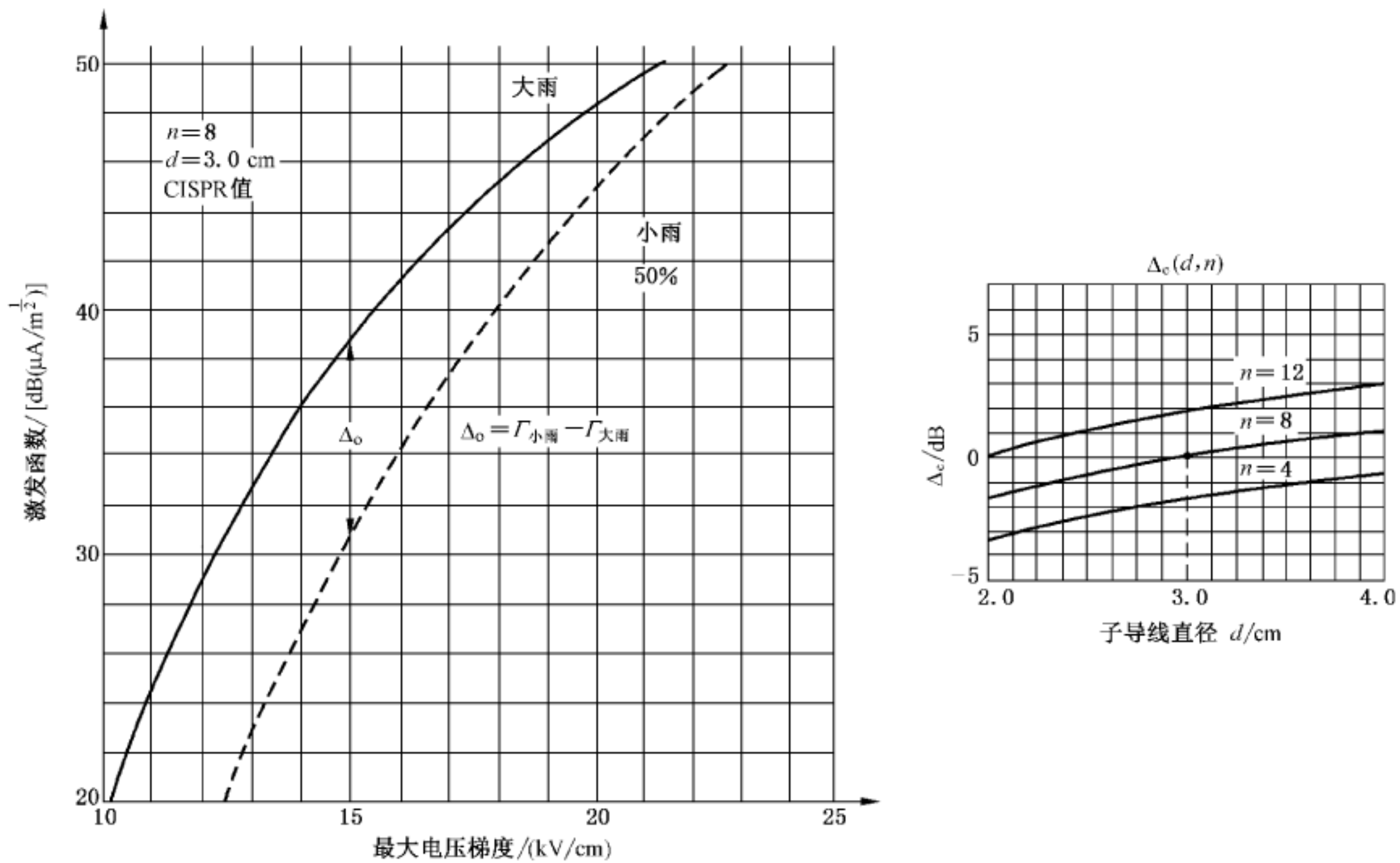


图 1 分裂导线

修正系数应用于大雨情况下的激发函数,用来得到小雨与全天候条件下的激发函数,是最大电位梯度和子导体数的函数。

$$\Gamma_{\text{小雨}} = \Gamma_{\text{大雨}} + \Delta_0 + \Delta_c$$

好天气情况下的激发函数由小雨激发函数减去 17 dB 得到

$$\Gamma_{\text{好天气}} = \Gamma_{\text{小雨}} - 17$$

在温带气候下,全天候条件下激发函数 Γ 的 80% 值可由大雨激发函数减去 10 dB~15 dB 得到。

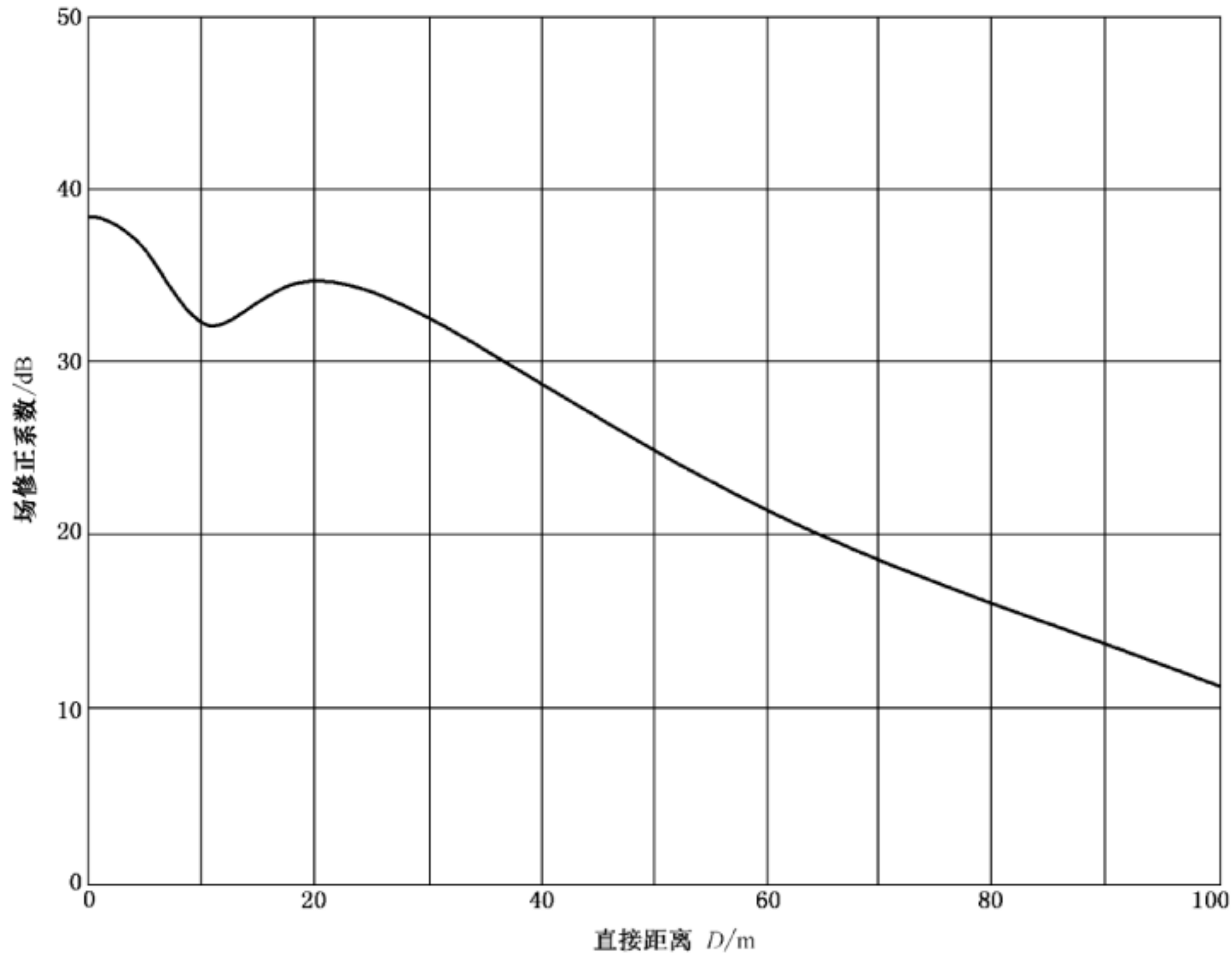


图 2 水平排列导线的曲线

对于中相的激发函数进行修正计算,可得到无线电噪声场强,单位为 dB($\mu\text{V}/\text{m}$)。激发函数作为距离线路中央直接距离 D 的函数,有以下特性、模矩阵和衰减系数:

$h = 20 \text{ m}$ (对地最小高度);

$S = 15 \text{ m}$ (相间距离);

$d = 3 \text{ cm}$ (子导体直径);

$n = 8$ (分裂导线中子导体数);

$s = 450 \text{ mm}$ (分裂导线间距);

$\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ (土壤电阻率);

$f = 0.5 \text{ MHz}$ (频率)。

$$|N| = \begin{vmatrix} 0.442 & 0.707 & 0.552 \\ -0.781 & 0.0 & 0.625 \\ 0.442 & -0.707 & 0.552 \end{vmatrix} \quad (\text{模矩阵})$$

$$\alpha_1 = 10 \times 10^{-6} \text{ Np/m}$$

$$\alpha_2 = 70 \times 10^{-6} \text{ Np/m} \quad (\text{模衰减系数})$$

$$\alpha_3 = 350 \times 10^{-6} \text{ Np/m}$$

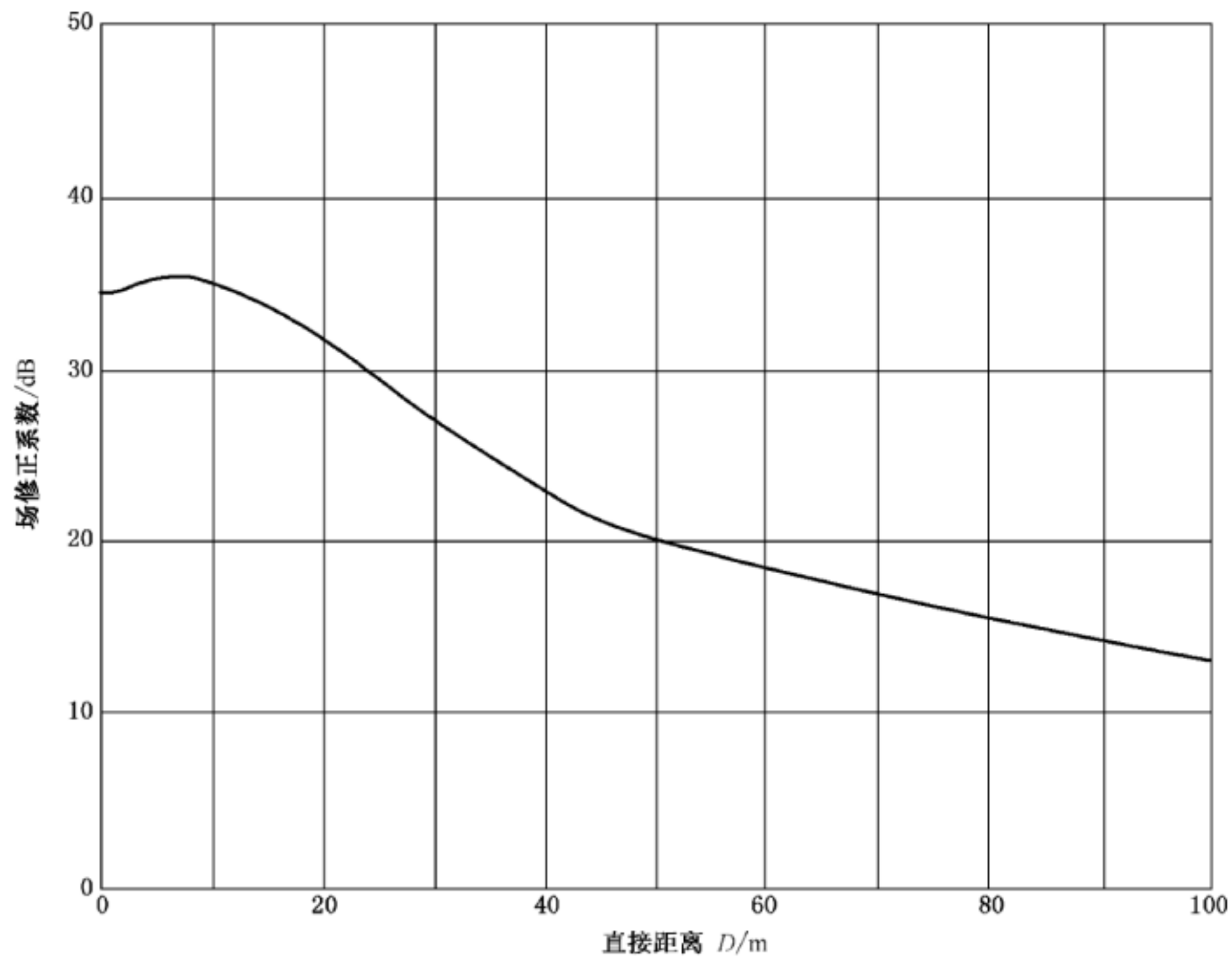


图3 三角形排列导线的曲线

对于中相的激发函数进行修正计算,可得到无线电噪声场强,单位为 $\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})$,激发函数作为距离线路中央直接距离 D 的函数,有以下特性、模矩阵和衰减系数:

$h = 20 \text{ m}$ (边相对地最小高度);

$h = 33 \text{ m}$ (中相对地最小高度);

$S = 15 \text{ m}$ (相间距离);

$d = 3 \text{ cm}$ (子导体直径);

$n = 8$ (分裂导线中子导体数);

$s = 450 \text{ mm}$ (分裂导线间距);

$\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ (土壤电阻率);

$f = 0.5 \text{ MHz}$ (频率)。

$$|N| = \begin{vmatrix} 0.412 & 0.707 & 0.574 \\ -0.812 & 0.0 & 0.583 \\ 0.412 & -0.707 & 0.574 \end{vmatrix} \quad (\text{模矩阵})$$

$$\alpha_1 = 10 \times 10^{-6} \text{ Np/m}$$

$$\alpha_2 = 25 \times 10^{-6} \text{ Np/m} \quad (\text{模衰减系数})$$

$$\alpha_3 = 300 \times 10^{-6} \text{ Np/m}$$

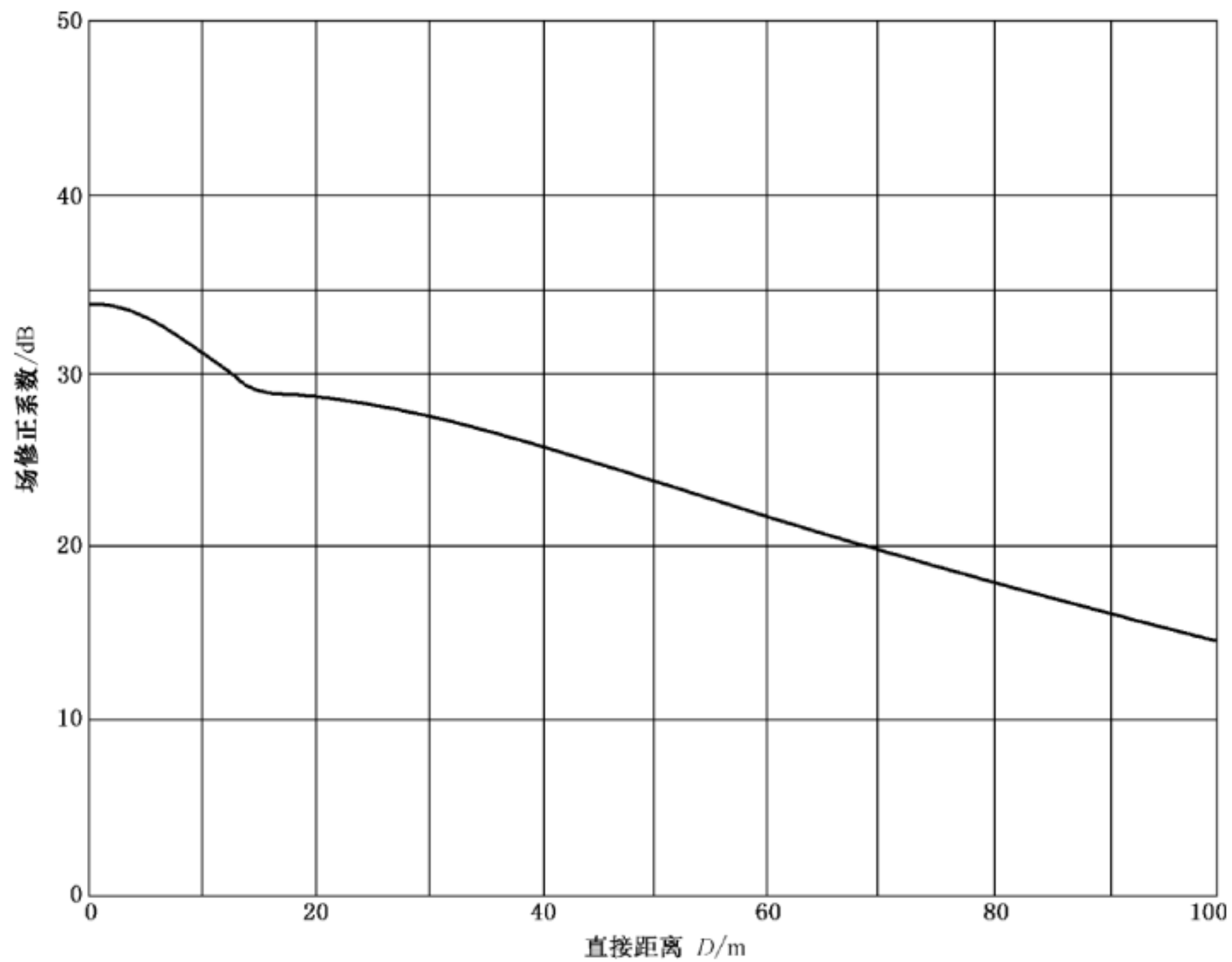


图 4 倒三角形排列导线的曲线

对于中相的激发函数进行修正计算,可得到无线电噪声场强,单位为 dB(μ V/m),激发函数作为距离线路中央直接距离 D 的函数,有以下特性、模矩阵和衰减系数:

- $h = 33$ m(边相对地最小高度);
- $h = 20$ m(中相对地最小高度);
- $S = 15$ m(相间距离);
- $d = 3$ cm(子导体直径);
- $n = 8$ (分裂导线中子导体数);
- $s = 450$ mm(分裂导线间距);
- $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ (土壤电阻率);
- $f = 0.5$ MHz(频率)。

$$|N| = \begin{vmatrix} 0.476 & 0.707 & 0.447 \\ -0.740 & 0.0 & 0.775 \\ 0.476 & -0.707 & 0.447 \end{vmatrix} \quad (\text{模矩阵})$$

$$\alpha_1 = 25 \times 10^{-6} \text{ Np/m}$$

$$\alpha_2 = 15 \times 10^{-6} \text{ Np/m} \quad (\text{模衰减系数})$$

$$\alpha_3 = 250 \times 10^{-6} \text{ Np/m}$$

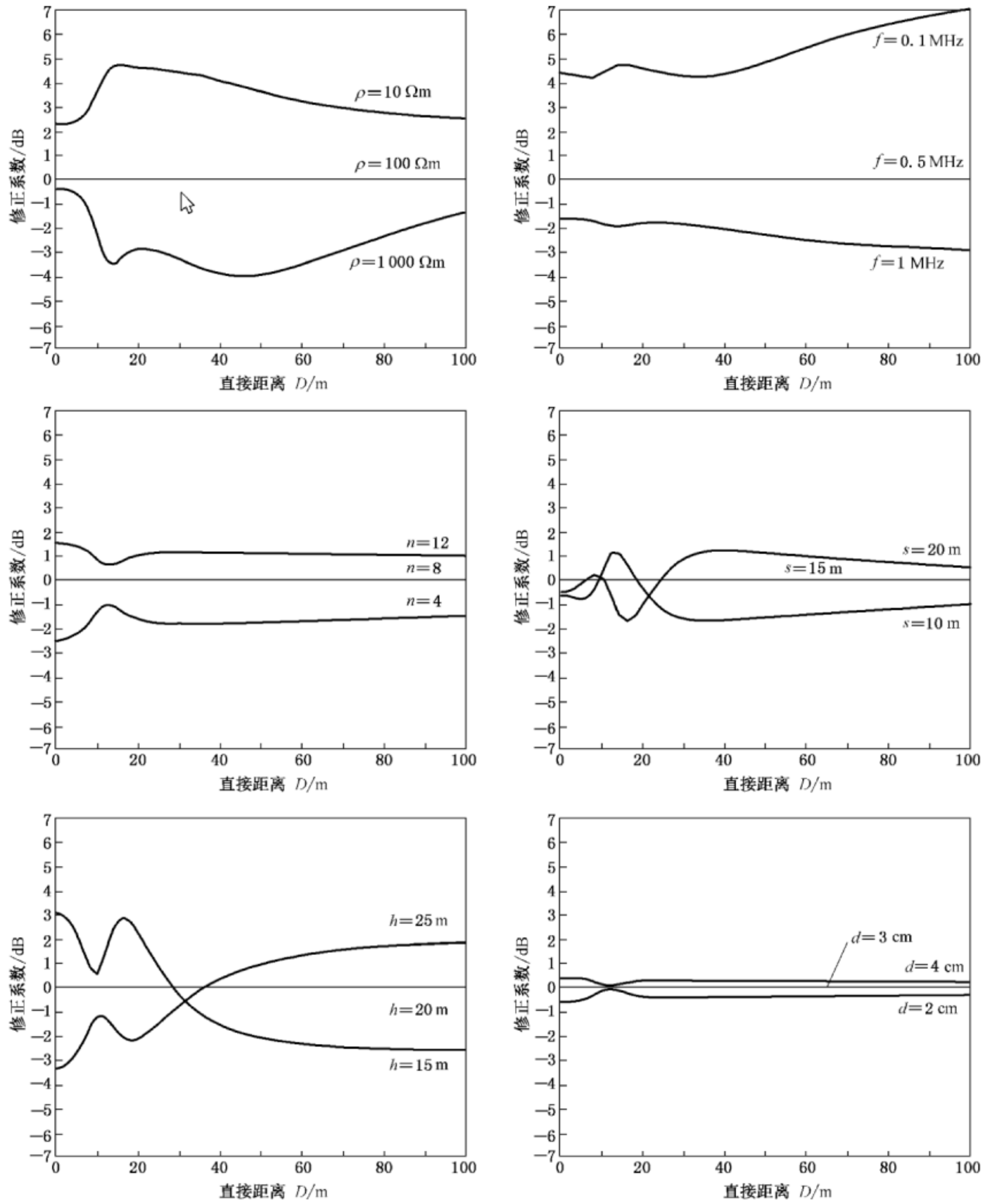


图5 水平排列导线的曲线

修正(单位为 dB)应用于图 2 得到的参考无线电噪声电场强度,考虑了土壤电阻率 ρ 、频率 f 、子导体数 n 、相间距离 S 、对地最小高度 h 和子导体直径 d 。

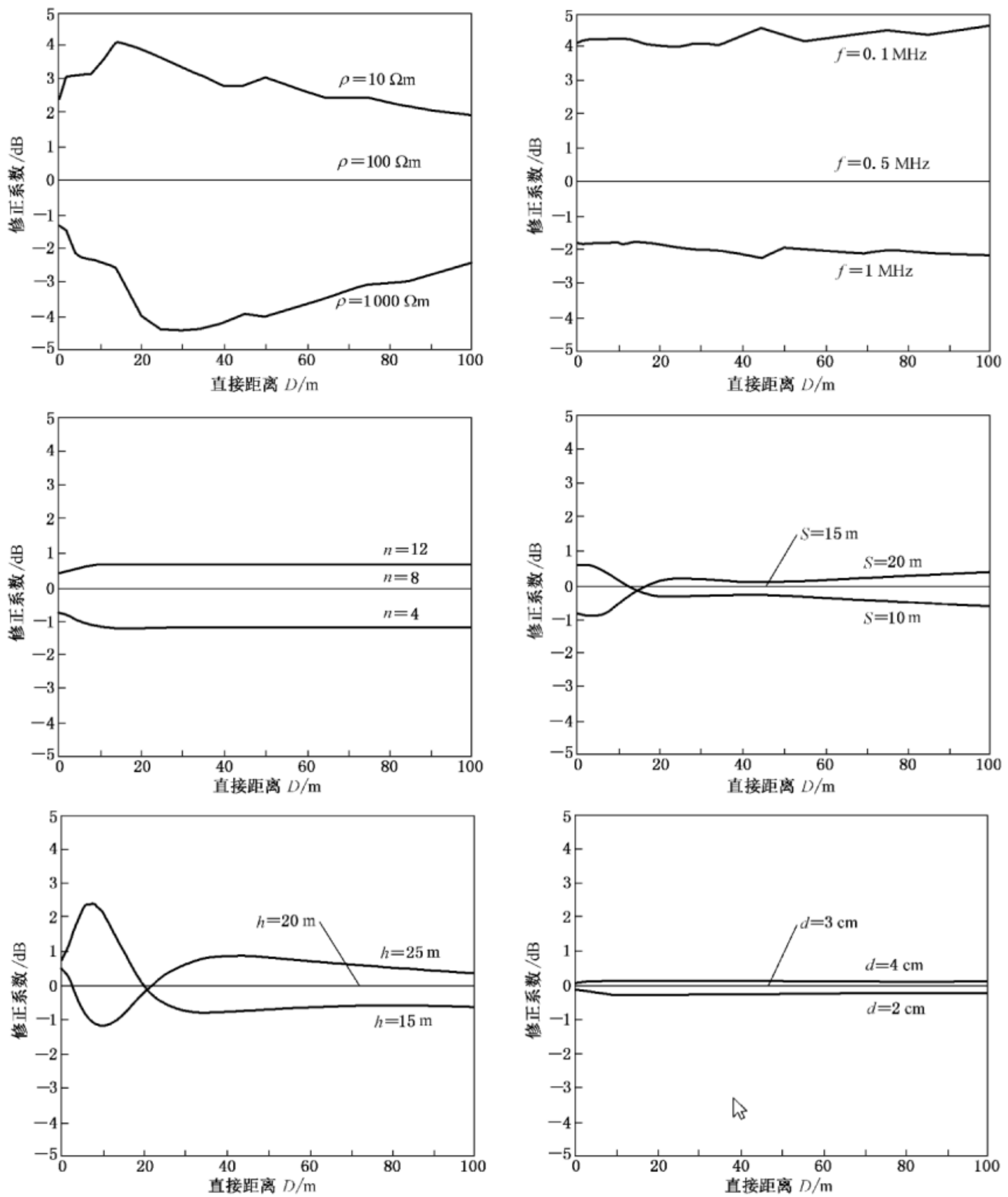


图 6 三角形排列导线的曲线

修正(单位为 dB)应用于图 3 得到的参考无线电噪声电场强度,考虑了土壤电阻率 ρ 、频率 f 、子导体数 n 、相间距离 S 、对地最小高度 h 和子导体直径 d 。

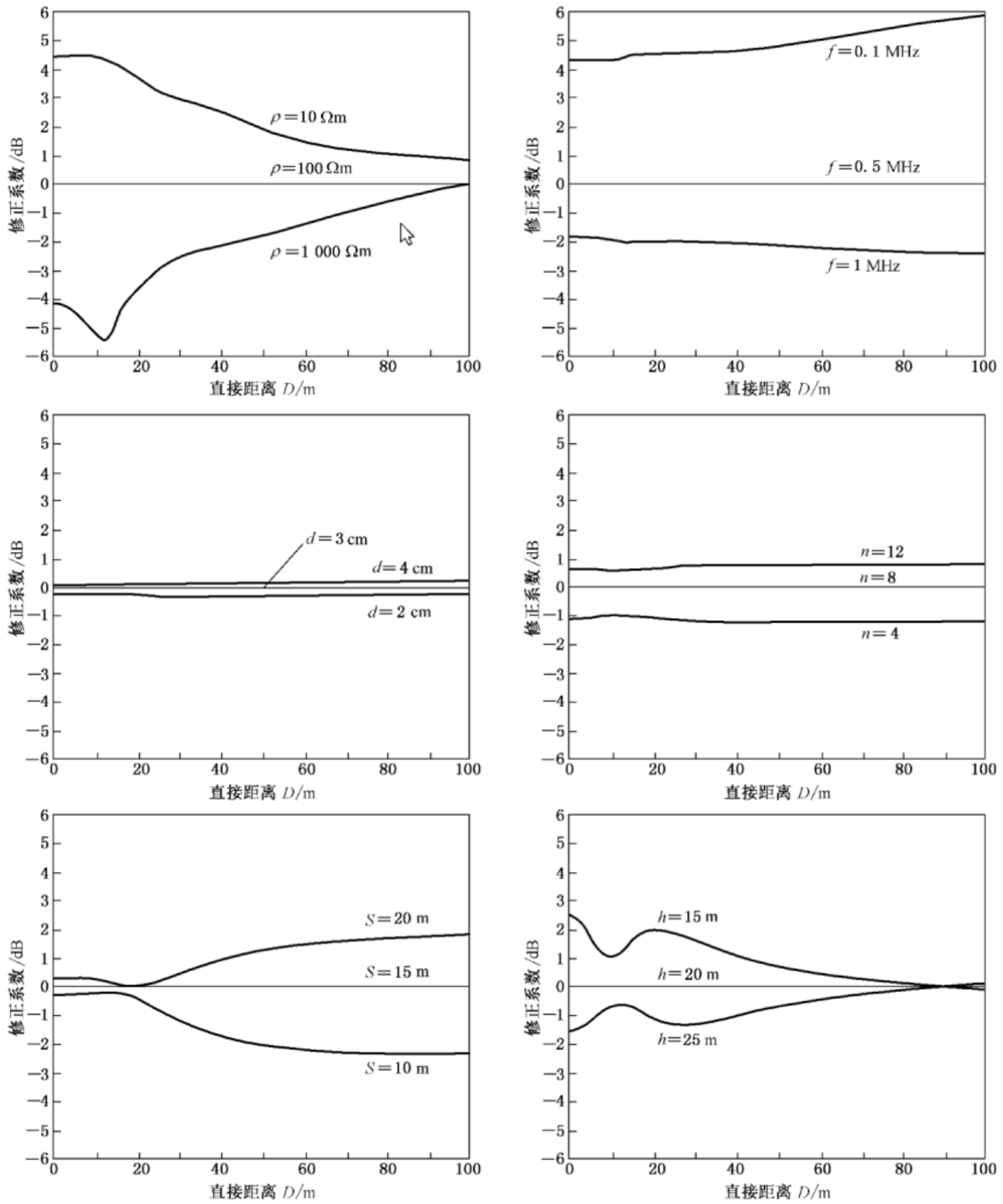


图7 倒三角形排列导线的曲线

修正(单位为 dB)应用于图4得到的参考无线电噪声电场强度,考虑了土壤电阻率 ρ 、频率 f 、子导体数 n 、相间距离 S 、对地最小高度 h 和子导体直径 d 。

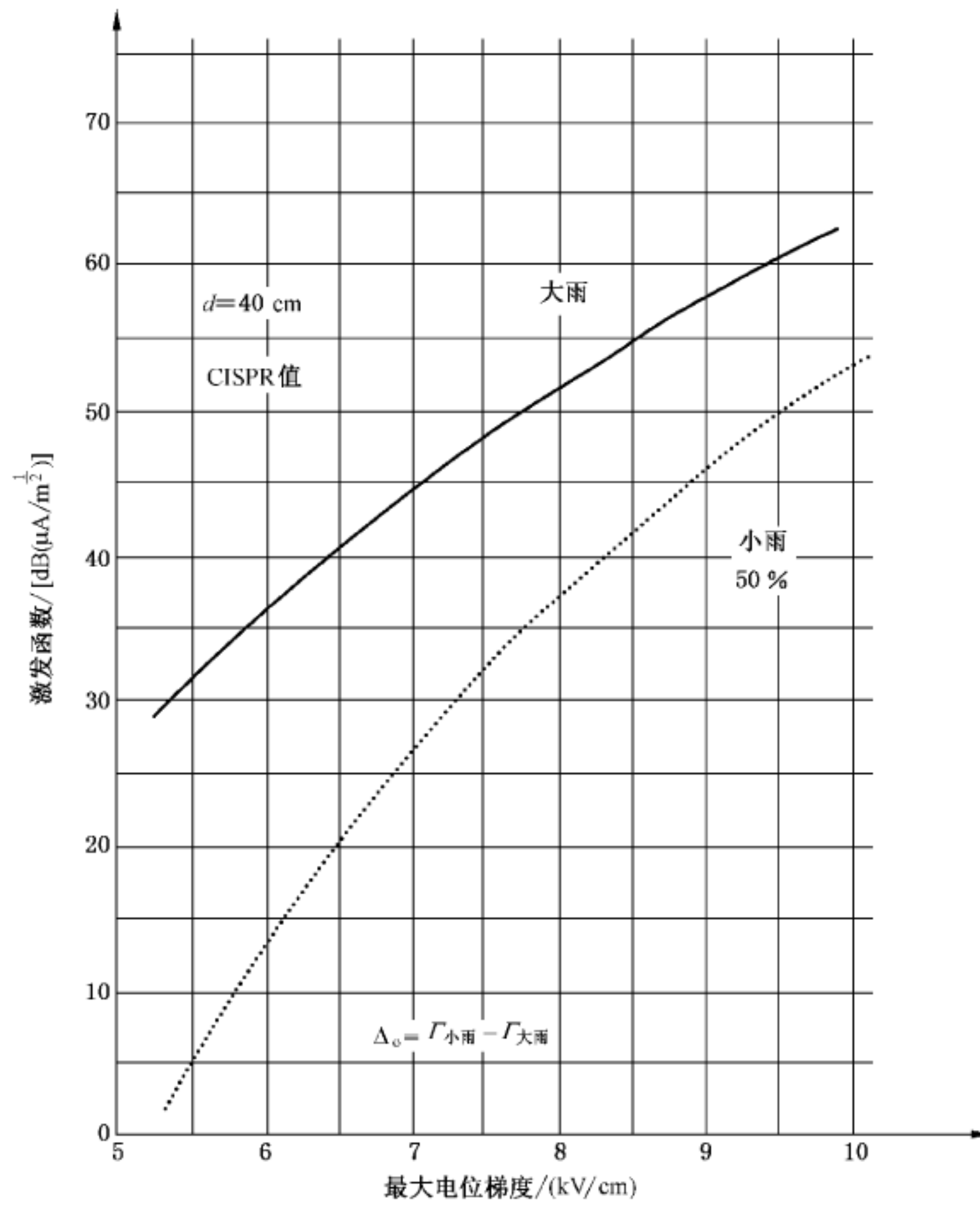


图 8 40 cm 直径管状导体

将修正系数(单位为 dB)应用于大雨激发函数,可得到小雨下的激发函数,是最大电位梯度的函数。

附录 A

(资料性附录)

架空线路导线无线电噪声场强的预测公式

A.1 通用 CIGRE 公式

这个简单公式给出了最可能的无线电噪声场强,以及在距离最近导线 20 m、高于地面 2 m 处的、由 CISPR 接收机测得的频率为 500 kHz 的总场强。

单相线路的基本公式(A.1)如下:

$$E = 3.5g_{\max} + 12r - 30 \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

E ——无线电噪声场强,单位为微伏每米分贝[$\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})$];

g_{\max} ——导线表面的最大电位梯度有效值,单位为千伏每厘米(kV/cm);

r ——导线半径,单位为厘米(cm)。

宜进行导线表面最大电位梯度的精确计算,因为它对无线电噪声水平具有重要影响。CISPR/TR 18-1:2010 附录 A 中介绍了一种计算方法。

对于单回三相线路,上述公式可扩展为:

$$E_1 = 3.5g_{\max} + 12r_1 - 33\log_{10} \frac{D_1}{20} - 30$$

$$E_2 = 3.5g_{\max} + 12r_2 - 33\log_{10} \frac{D_2}{20} - 30$$

$$E_3 = 3.5g_{\max} + 12r_3 - 33\log_{10} \frac{D_3}{20} - 30$$

式中:

D_1 、 D_2 和 D_3 ——该相导线到测量仪器天线的距离,单位为米(m)。

这些公式也可用来确定非 20 m 参考距离的测量位置的无线电噪声场强。

三个场强的总量由下面方法求出:如果一个场强值比其余两个至少大 3 dB,那么后者可被忽略,否则:

$$E = \frac{E_a + E_b}{2} + 1.5$$

式中:

E_a 、 E_b ——较大的两个场强值,单位为微伏每米分贝[$\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})$]。

对于双回线路,由六相导线中每相导线所产生的无线电噪声按上述方法在测量位置上计算,同相位导线产生的场强按平方和相加,然后将三个合成场强再用上述方法叠加。

应指出,这种方法给出的是线路在好天气下 500 kHz 时最可能产生的噪声水平。要得到不同于 500 kHz 时产生的噪声水平,应采用 CISPR/TR 18-1:2010 附录 B 的图 B.14 所示的修正曲线。如果要计算非 20 m 处的噪声水平,则要用 CISPR/TR 18-2:2010 中 5.3.6 的公式。

坏天气条件外的无线电噪声水平可按 CISPR/TR 18-1:2010 附录 B 中图 B.14 进行估算。

考虑海拔高度的影响则可采用下列计算:

$$E_h = E_0 + \frac{a - a_0}{300}$$

式中:

E_0 ——各相导线在海拔高度 a_0 (m) 时的无线电噪声场强, 单位为微伏每米分贝 [dB(μ V/m)];

E_h ——在观察点 E_0 处的无线电噪声场强, 单位为微伏每米分贝 [dB(μ V/m)], 由每相导线在不同海拔高度 a (m) 处引起。

A.2 世界各地部分机构使用的预测公式的整理

表 A.1 包含全世界部分机构预测公式的回顾, 表 A.1 的信息来自研究的文献, 详见参考文献 [5, 14, 15]。

表 A.2 提供了包含表 A.1 中所有项的完整公式, 用于比较, 例如不同电压等级架空线路设计的无线电噪声的对比。

表 A.3 提供这些计算结果下的绝对场强度计算的算例。

表 A.1 多家机构在研究中制定的经验法和预判定公式

公式	参考值 dB($\mu\text{V}/\text{m}$)	最大梯度 G kV/cm	导体直径	分导线数量	直线距离 D m	频率 f MHz	气候条件
E	E_0	E_G	E_d	E_n	E_D	E_f	E_{wt}
CIGRE ^a	-30	$3.5G_m$	$6d$	—	$-30 \log\left(\frac{D_d}{20}\right)$	—	—
400 kV—FG ^b (德国)	53.7 ± 5	$K_g(G_m - 16.95)$ $K_g = 3$, 对于 750 kV 电压级别 $K_g = 3$, 对于其他线 路。梯度极限为: 15 kV/cm ~ 19 kV/cm	$40 \log\left(\frac{d}{3.93}\right)$	$E_n = -4.1$ 线路 $E_n = 10 \log\left(\frac{n}{4}\right)$, $n > 1$	$20K_D \log\left(\frac{20}{D}\right)$ $K_D = 1.6 \pm 0.1$ (0.5 MHz ~ 1 MHz)	$20 \log\left(\frac{1+0.5^2}{1+f^2}\right)$	好天气 0 坏天气 17 ± 3
ENEL ^b (意大利)	47	$3.8(G_a - 15.0)$	$40 \log\left(\frac{d}{5.0}\right)$	$10 \log(n)$	$30 \log\left(\frac{20}{D_d}\right)$	$20 \log\left(\frac{1+0.5^2}{1+f^2}\right) + \frac{q}{300}$ $E_f = 0$, 对于 1 MHz	14 (坏天气 L_{50})
CRIEPI ^b (日本)	—	$3.7(G_m - 12.2) \pm 3$	$40 \log\left(\frac{d}{2.53}\right)$	—	$20 \log\left(\frac{10h}{D^2}\right)$ h : 导体和天线之 间的高度差	$-12(\log f)^2 - 17 \log(f)$	采用底部 表面 梯度 G_P
WESTING- HOUSE ^b (美国)	46	$3.5(G_m - 17.5)$	$30 \log\left(\frac{d}{3.51}\right)$	—	$20 \log\left(\frac{30.7h}{D_d^2}\right)$	$10(1-f)$	24 (雨天 L_5)
EGU ^b (捷克)	11	$4.5G_m$	—	—	$-34 \log(D_d)$	$-22 \log(f) - 15 \log^2(f)$	—

表 A.1 (续)

公式	参考值 dB($\mu\text{V}/\text{m}$)	最大梯度 G kV/cm	导体直径	分导线数量	直线距离 D m	频率 f MHz	气候条件
Ontario Hydro ^b (加拿大)	R	$A \log\left(\frac{G_m}{18.8}\right)$	$40 \log\left(\frac{d}{2.54}\right)$	—	$B \log\left(\frac{30.5}{D_d}\right)$	$20 \log\left(\frac{C+1}{C+f^2}\right)$	—
	$R = 34 \text{ dB} \pm 6$ (参考值 50%, 晴天), 水平导线 $R = 37 \text{ dB} \pm 6$ (参考值 50%, 晴天), 垂直导线 $R = 63 \text{ dB}$ (最大值, 恶劣天气), 水平导线 $R = 66 \text{ dB}$ (最大值, 恶劣天气), 垂直导线			$A = 146$, 晴天 $A = 120$, 恶劣天气	$B = 40$, 水平导线 $B = 32$, 垂直导线	$C = 1$ 当 $t \geq 1 \text{ MHz}$ $C = 0.5$ 当 $f < 1 \text{ MHz}$	
KEPCO ^c (韩国)	-105.81 -81.98	$117.42 \log(G_a)$ $119.56 \log(G_a)$	$40.38 \log(d)$ $43.57 \log(d)$	$1.54 \log(n)$ $3.97 \log(n)$	$-10.22 \log(D_d)$ $-19.05 \log(D_d)$	$-27.10 \log(f)$ $-25.07 \log(f)$	好天气 恶劣天气
BPA ^d (美国)	46	$120 \log\left(\frac{G_a}{18.56}\right)$	$40 \log\left(\frac{d}{3.51}\right)$	—	$\frac{q}{300} - C1 + C2$	$10(1 - (\log(10f))^2)$	17(雨天 L_{50}) 24(雨天 L_5)

^a CIGRE WG 36.01 电气系统电晕效应所致干扰现象 干扰现象计算指南, 1974 (参见参考文献[14])。
^b IEEE 无线电噪声分组委员会报告, 基于 CIGRE/IEEE 调查结果的无线电噪声预测法比较, IEEE 电力设备和电力系统论文集, 第 92 卷第 3 辑, 1973 年 5 月/6 月 (参见参考文献[5])。
^c Mono Ju, Kwangho Yang, Sungho, Myung, Kooyong Shin, Dongil Lee, 高压交流输电线路电晕所致噪声预测新公式的开发, ICEE 2002。第 2147-2150 页, 2002 年 (参见参考文献[15])。
^d CIGRE WG 36.01 电气系统电晕效应所致干扰现象 干扰现象计算指南, 1996 年 12 月 (参见参考文献[16])。

表 A.2 多家机构在研究中制定的经验法和完整预判定公式

序号	方法	比较公式 $E - E_0$ (dB)	三相系数 有效值范围,尽可能大
1	400 kVFG (德国)	$E - E_0 \text{ (dB)} = K_g \cdot \log_{10} \left(\frac{g_m}{g_{m0}} \right) + 40 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{n}{n_0} \right) +$ $K_D \cdot \log_{10} \left(\frac{D_0}{D} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{1+f_0^2}{1+f^2} \right)$	$K_g = 3$ 当 $U = 765$ kV, $K_g = 3.5$ 当 $U \leq 700$ kV, 有效范围 15 kV/cm $< g_m < 19$ kV/cm $K^D = 32 \pm 2$, 有效范围 0.5 MHz $< f < 1$ MHz $E_1 = E_1$ 当 $E_1 - E_2 < 3$ dB, $E_1 = \frac{E_1 + E_2}{2} + 15$ dB 当 $E_1 - E_2 \geq 3$ dB
2	ENEL (意大利)	$E - E_0 \text{ (dB)} = 3.8 \log_{10} \left(\frac{g_a}{g_{a0}} \right) + 40 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{n}{n_0} \right) + 30 \log_{10} \left(\frac{D_0}{D} \right)$ $+ 20 \log_{10} \left(\frac{1+f_0^2}{1+f^2} \right) + \frac{q - q_0}{300}$	$E_1 = E_1$, 同相各导体的分量值 E_1 的平方值相加
3	Shiobara (日本)	$E - E_0 \text{ (dB)} = F(g_m) - F(g_0) + 40 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) +$ $20 \log_{10} \left(\frac{10h}{D^2} \right) - 17 \log_{10} \left(\frac{f}{f_0} \right) - 12 \left[\log_{10} \left(\frac{f}{f_0} \right) \right]^2$ <p>对于 g_m, 采用底部一表面梯度 G_P</p>	好天气(有效值的 50%): $F(g_m) - F(g_0) = (3.7g_m - 12.2) \pm 3$ 坏天气(大雨): $F(g_m) - F(g_0) = 10.5g_m - \left(\frac{g_m}{2} \right)^2 - 31, g_m \leq 17$ kV/cm $F(g_m) - F(g_0) = 4.375g_m - \left(\frac{g_m}{4} \right)^2 + 19.5, g_m > 17$ kV/cm
4	WESTING- HOUSE (美国)	$E - E_0 \text{ (dB)} = 3.5 \log_{10} \left(\frac{g_m}{g_{m0}} \right) + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + 20 \log_{10} \left[\frac{h}{h_0} \cdot \left(\frac{D_0}{D} \right)^x \right] +$ $10 \log_{10} \left(\frac{f_0}{f} \right) + 40 \log_{10} \left(1 - \frac{\delta}{\delta_0} \right)$	$x = 2$ 当 $D < 60$ m, $x = 1$ 当 $D > 60$ m, 有效范围 0.2 MHz $< f < 1.6$ MHz
5	EGU (捷克)	$E - E_0 \text{ (dB)} = 4.5 \log_{10} \left(\frac{g_m}{g_{m0}} \right) + 34 \log_{10} \left(\frac{D_0}{D} \right) + 22 \log_{10} \left(\frac{f_0}{f} \right) + 15 \log_{10} \left(\frac{f_0}{f} \right)^2$
6	ONTARIO HYDRE (加拿大)	$E - E_0 \text{ (dB)} = K_g \cdot \log_{10} \left(\frac{g_m}{g_{m0}} \right) + 40 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) +$ $K_D \cdot \log_{10} \left(\frac{D_0}{D} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{c + f_0^2}{c + f^2} \right)$

表 A.2 (续)

序号	方法	比较公式 $E - E_0$ (dB)	三相系数 有效值范围,尽可能大
7	AEP 测试线路 (美国)	$E - E_0 \text{ (dB)} = 3.5 \log_{10} \left(\frac{g_m}{g_{m0}} \right)$	只适用于与测试线路配置相同的 500 kV 和 750 kV 线路, $f_n = 1$ MHz 配置 A: 500 kV..... 配置 B: 750 kV..... 配置 C: 750 kV.....
8	通用电气 公司超高压项目,基 准案例 (美国)	本方法确定了好天气条件下平均射频干扰的水平。可以用一系列的曲线图来修正多个参数。 参见《爱迪生电器研究院参考指南》,1968 年,第 5 章,第 173-214 页[1]	
9	CIGRE	$E - E_0 \text{ (dB)} = 3.5g + 12r - 30$	
10	KEPCO (韩国)	好天气: $E - E_0 \text{ (dB)} = 117.41 \log_{10} \left(\frac{g_a}{g_{a0}} \right) + 40.38 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) +$ $1.54 \log_{10} \left(\frac{n}{n_0} \right) - 10.22 \log_{10} \left(\frac{D}{D_0} \right) - 27.10 \log_{10} \left(\frac{f}{f_0} \right)$ 坏天气: $E - E_0 \text{ (dB)} = 119.56 \log_{10} \left(\frac{g_a}{g_{a0}} \right) + 43.57 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) +$ $3.97 \log_{10} \left(\frac{n}{n_0} \right) - 19.05 \log_{10} \left(\frac{D}{D_0} \right) - 25.07 \log_{10} \left(\frac{f}{f_0} \right)$
11	BPA (美国)	$E - E_0 \text{ (dB)} = 120 \log_{10} \left(\frac{g_a}{g_{a0}} \right) + 40 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{1+f_0^2}{1+f^2} \right) + \frac{q-q_0}{300} - C_1 + C_2$	

表 A.3 绝对场强水平计算的预判定公式和实例

序号	方法	绝对场强水平 E 的计算 [dB(μ V/m)]	参考场强值 dB(μ V/m)		
			好天气	一般坏天气	一般大雨天
1	400 kVFG (德国)	$E[\text{dB}(\mu\text{V/m})] = E_0 + K_g \cdot \log_{10}\left(\frac{g_m}{16.95}\right) + 40 \log_{10}\left(\frac{d}{3.93}\right) + 10 \log_{10}\left(\frac{n}{4}\right) + K_D \cdot \log_{10}\left(\frac{20}{D}\right) + 20 \log_{10}\left(\frac{1+0.5^2}{1+f^2}\right), f_0=0.5 \text{ MHz}$	56±5	—	73.7±3
2	ENEL (意大利)	$E[\text{dB}(\mu\text{V/m})] = E_0 + 3.8 \log_{10}\left(\frac{g_a}{15}\right) + 40 \log_{10}\left(\frac{d}{5.0}\right) + 10 \log_{10}\left(\frac{n}{1}\right) + 30 \log_{10}\left(\frac{20}{D}\right) + 20 \log_{10}\left(\frac{2}{1+f^2}\right), f_0=1 \text{ MHz}$	55	64	68
3	Shiobara (日本)	$E[\text{dB}(\mu\text{V/m})] = E_0 + F(g_m) - F(g_0) + 40 \log_{10}\left(\frac{d}{2.33}\right) + 20 \log_{10}\left(\frac{10h}{D^2}\right) - 17 \log_{10}\left(\frac{1}{f_0}\right) - 12 \left[\log_{10}\left(\frac{1}{f_0}\right) \right]^2, f_0=1 \text{ MHz}$	—	—	—
4	WESTINGHOUSE (美国)	$E[\text{dB}(\mu\text{V/m})] = 3.5 \log_{10}\left(\frac{g_m}{17.5}\right) + 30 \log_{10}\left(\frac{d}{3.51}\right) + 20 \log_{10}\left[\frac{h}{13} \cdot \left(\frac{20}{D}\right)^x\right] + 10 \log_{10}\left(\frac{1}{f}\right) + 40 \log_{10}\left(1 - \frac{\delta}{1}\right), f_0=1 \text{ MHz}$	48	—	70
5	EGU (捷克)	$E[\text{dB}(\mu\text{V/m})] = 4.5 \log_{10}\left(\frac{g_m}{15}\right) + 34 \log_{10}\left(\frac{20}{D}\right) + 22 \log_{10}\left(\frac{1}{f}\right) + 15 \log_{10}\left(\frac{1}{f}\right)^2, f_0=1 \text{ MHz}$	37	47	—

表 A.3 (续)

序号	方法	绝对场强水平 E 的计算 [dB(μ V/m)]	参考场强值 dB(μ V/m)		
			好天气	一般坏天气	一般大雨天
6	ONTARIO HYDRE (加拿大)	$E[\text{dB}(\mu\text{V/m})] = K_g \cdot \log_{10} \left(\frac{g_m}{18.8} \right) + 40 \log_{10} \left(\frac{d}{2.54} \right) +$ $K_D \cdot \log_{10} \left(\frac{30.5}{D} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{c+1}{c+f^2} \right), f_0 = 1 \text{ MHz}$	32 (水平导线)	—	61 (最坏的天气, 水平导线)
			36 (垂直导线)	—	36 (最坏的天气, 垂直导线)
7	AEP 线路测试法 (美国)	$E[\text{dB}(\mu\text{V/m})] = 3.5 \log_{10} \left(\frac{g_m}{g_{m0}} \right)$	配置 A	55.7	62.7
			配置 B	62.5	69.5
			配置 C	67.5	74.5
8	通用电气公司超 高压项目, 基准 案例 (美国)	<p>本方法确定了好天气条件下平均射频干扰的水平。可以用一系列的曲线图来修正多个参数。 参见《爱迪生电器研究院参考指南》, 1968 年, 第 5 章, 第 173-214 页 [1]</p>	—	—	—
9	CIGRE	$E[\text{dB}(\mu\text{V/m})] = 3.5g + 12r - 30, f_0 = 1 \text{ MHz}$	—30	—	—
10	KEPCO (韩国)	$E[\text{dB}(\mu\text{V/m})] = 117.41 \log_{10} \left(\frac{g_a}{1} \right) + 40.38 \log_{10} \left(\frac{d}{1} \right) + 1.54 \log_{10} \left(\frac{n}{1} \right) -$ $10.22 \log_{10} \left(\frac{D}{1} \right) - 27.10 \log_{10} \left(\frac{f}{1} \right), f_0 = 1 \text{ MHz}$	—105.8	—81.98	—
		$E[\text{dB}(\mu\text{V/m})] = 119.56 \log_{10} \left(\frac{g_a}{1} \right) + 43.57 \log_{10} \left(\frac{d}{1} \right) + 3.97 \log_{10} \left(\frac{n}{1} \right) -$ $19.05 \log_{10} \left(\frac{D}{1} \right) - 25.07 \log_{10} \left(\frac{f}{1} \right), f_0 = 1 \text{ MHz}$			
		$E[\text{dB}(\mu\text{V/m})] = 120 \log_{10} \left(\frac{g_a}{17.56} \right) + 40 \log_{10} \left(\frac{d}{3.51} \right) + 10 \left[(1 - \log_{10} 10f)^2 \right] + \frac{q}{300} - C_1 + C_2$			
11	BPA (美国)	$E[\text{dB}(\mu\text{V/m})] = 120 \log_{10} \left(\frac{g_a}{17.56} \right) + 40 \log_{10} \left(\frac{d}{3.51} \right) + 10 \left[(1 - \log_{10} 10f)^2 \right] + \frac{q}{300} - C_1 + C_2$	46	63	70

附录 B

(资料性附录)

多分裂导线架空线路给定距离处的无线电噪声场强的预测分析程序

B.1 分析步骤

本程序参考的是图 B.1 所示的导线结构。

- 1) 确定距参考断面纵向距离 x 处的电晕电流 $|i_o|$ ，它是第一相激发函数 Γ_1 作用的结果，认为导线沿线的激发函数是常数(电晕源均匀分布)。

$$|i_o| = |C| \cdot |\Gamma| / 2\pi\epsilon_0 \quad |\Gamma| = \begin{vmatrix} \Gamma_1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

式中：

$|C|$ ——线路的电容矩阵；

ϵ_0 ——空气的绝对介电常数。

- 2) 通过模变换矩阵 $|N|$ ，确定模电流 $|i_{om}|$ 。获得模变换矩阵的方法是：先求出 $|B|$ 矩阵， $|B| = |Y| \cdot |Z|$ 。模变换 $|N|$ 矩阵是 $|B|$ 矩阵的特征向量。($|Z|$ 和 $|Y|$ 矩阵分别是串联阻抗矩阵和并联导纳矩阵。) 或者，更简单的方法是，取 $|C|^{-1}$ 的特征向量，作为模变换矩阵 $|N|$ 。给出了图 2、图 3 和图 4 所示的不同的导线布置方式下的模变换 $|N|$ 矩阵的典型值。

$$|i_{om}| = |N|^{-1} \cdot |i_o|$$

通过模传播系数 ($\lambda_m = \alpha_m + j \cdot \beta_m$)，并且认为电流一分为二注入线路的两侧，就可以确定导线参考断面的模电流 $|i_m(x)|$ 。

$$|i_m(x)| = 0.5 \exp(-\lambda_m \cdot x) \cdot |i_{om}| \quad (m = 1, 2, 3)$$

系数 λ_m ，可以通过矩阵 $|B|$ 的特征值获得，也可以通过试验获得。图 2、图 3 和图 4 中给出了不同线路布置方式情况下的典型 α_m 值。

- 3) 确定线路参考断面的相电流。

$$|i(x)| = |N| \cdot |i_m(x)|$$

- 4) 确定距参考位置的横向距离 y 处的磁场强度 $H_1(x, y)$ 的水平分量，对应的电场强度的垂直分量 $E_1(x, y)$ 。

$$E_1(x, y) = 120\pi \cdot H_1(x, y) = 60 \sum_j i_j(x) \cdot F_j(y)$$

其中：

$$F_j(y) = z_j / [z^2 + (y - y_j)^2] + (z_j + 2p) / [(z_j + 2p)^2 + (y - y_j)^2]$$

并且

$$p = \sqrt{\rho / (\pi\mu_0 f)}$$

ρ ——土壤电阻率，单位为欧米 ($\Omega \cdot m$)；

f ——频率，单位为赫兹 (Hz)；

μ_0 ——自由空间的磁导率。

- 5) 距离线路参考断面不同纵向距离的电晕源，对场强的贡献，通过平方和定律累加。

$$E_1(y) = \sqrt{\left(2 \int |E_1(x, y)|^2 dx \right)}$$

引入前面 $E_1(x, y)$ 的表达式, 进行积分, 并且假定 $\beta_m - \beta_n = \alpha_m - \alpha_n$, 就可以获得 $E_1(y)$ 下面的表达式。

$$E_1(y) = \sqrt{\left\{ \sum_m (A_m^2 / \alpha_m) + \sum_{m,n}^2 [A_m \cdot A_n \cdot (\alpha_m + \alpha_n) / (\alpha_m^2 + \alpha_n^2)] \right\}}$$

$$A_m = 30 i_{om} \sum_i [N_{i,m} F_i(y)] \quad (m, n = \text{模}; i = \text{相})$$

6) 对于相同的横向距离 y , 假定第 2 相和第 3 相产生电晕时, 用相同的方法计算。

$$|\Gamma|_2 = \begin{vmatrix} 0 \\ \Gamma_2 \\ 0 \end{vmatrix} \quad |\Gamma|_3 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \Gamma_3 \end{vmatrix}$$

7) 按降序排列电场强度 [单位为 $\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})$] 的 3 个值, 即 $[E_a(y) \quad E_b(y) \quad E_c(y)]$, 根据 CISPR 的规则, 可以得到总场强 $E(y)$ 的值 [单位为 $\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})$] 见下:

$E(y) = E_a(y)$, 如果 $E_a(y) \geq E_b(y) + 3 \text{ dB}$

$E(y) = [E_a(y) + E_b(y)] / 2 + 1.5 \text{ dB}$ (其他情况)

注: 对于双回线路, 运用相同步骤, 计算所有场强绝对值 $E'_1(y), E''_1(y); E'_2(y), E''_2(y); E'_3(y), E''_3(y)$ 。

$$E_1(y) = \sqrt{[E'^2_1(y) + E''^2_1(y)]}$$

$$E_2(y) = \sqrt{[E'^2_2(y) + E''^2_2(y)]}$$

$$E_3(y) = \sqrt{[E'^2_3(y) + E''^2_3(y)]}$$

B.2 给出了一个例子来说明上面的计算步骤。

B.2 无线电噪声场强计算举例

线路参数如下(参考图 2 的示意图)。

电压	$V = 1\,050 \text{ kV}$
分裂数	$n = 8$
子导线直径	$d = 3 \text{ cm}$
分裂间距	$s = 45 \text{ cm}$
最小对地高度	$h_1 = h_2 = h_3 = 20 \text{ m}$
弧垂	15 m
相间距离	$S = 15 \text{ m}$
两条地线	
土壤电阻率	$\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ 。

所以最大电位梯度是(参见 CISPR/TR 18-1:2010 中的附录 A):

对于边相 $16.5 \text{ kV}/\text{cm}$

对于中相 $18.2 \text{ kV}/\text{cm}$

大雨下的激发函数(见 7.2.2)

对于边相 $70 - 35.45 + 16.7 - 9.03 = 42.2 \text{ dB}(\mu\text{A}/\text{m}^{\frac{1}{2}})$ (对应 $128 \mu\text{A}/\text{m}^{\frac{1}{2}}$)

对于中相 $70 - 32.18 + 16.7 - 9.03 = 45.5 \text{ dB}(\mu\text{A}/\text{m}^{\frac{1}{2}})$ (对应 $188 \mu\text{A}/\text{m}^{\frac{1}{2}}$)

电容矩阵:

$$|C| / 2\pi\epsilon_0 = \begin{vmatrix} 0.244\,2 & -0.049\,1 & -0.012\,3 \\ -0.049\,1 & 0.256\,3 & -0.049\,1 \\ -0.012\,3 & -0.049\,1 & 0.244\,2 \end{vmatrix}$$

只考虑第一相产生的电晕, 那么

$$|\Gamma|_1 = \begin{vmatrix} 128 \\ 0.0 \\ 0.0 \end{vmatrix} \quad (\mu\text{A}/\text{m}^{\frac{1}{2}})$$

$$|i_o| = |C| \cdot |\Gamma|_1 / 2\pi\epsilon_o = \begin{vmatrix} 0.244 \ 2 \times 128 \\ -0.049 \times 128 \\ -0.012 \ 3 \times 128 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 31.25 \\ -6.28 \\ -1.57 \end{vmatrix} \quad (\mu\text{A}/\text{m}^{\frac{1}{2}})$$

为简化分析,假定

$$|N| = \begin{vmatrix} 0.442 & 0.707 & 0.552 \\ -0.781 & 0.0 & 0.625 \\ 0.421 & -0.707 & 0.552 \end{vmatrix} \quad [|N|^{-1} = |N|^T]$$

可以得出线路上产生的模电流

$$|i_o(m)| = |N|^{-1} \cdot |i_o| = \begin{vmatrix} 18.02 \\ 23.22 \\ 12.47 \end{vmatrix} \quad (\mu\text{A}/\text{m}^{\frac{1}{2}})$$

假定穿透深度 $p = 7.1 \text{ m}$,可以得到场的系数

y/m	$F_1(y)$	$F_2(y)$	$F_3(y)$
0	0.055 25	0.10	0.055 25
10	0.033 78	0.08	0.096 15
20	0.021 69	0.05	0.099 01
30	0.014 79	0.030 76	0.058 14
40	0.010 63	0.02	0.045 25
50	0.007 96	0.013 79	0.028 09

假定线路的模衰减因数($\rho = 100 \ \Omega \cdot \text{m}$, $f = 0.5 \text{ MHz}$)

$$\alpha_1 = 10 \times 10^{-6} \text{ Np/m}$$

$$\alpha_2 = 70 \times 10^{-6} \text{ Np/m}$$

$$\alpha_3 = 350 \times 10^{-6} \text{ Np/m}$$

电场强度水平 $E_1(y)$ 为:

y/m	$E_1(y)/[\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})]$
0	71.0
10	70.2
20	69.2
30	66.3
40	62.7
50	59.4

只考虑第二相产生的电晕

$$|\Gamma|_2 = \begin{vmatrix} 0.0 \\ 188 \\ 0.0 \end{vmatrix} \quad (\mu\text{A}/\text{m}^{\frac{1}{2}})$$

和前面相同的方法,电场强度 $E_2(y)$ 为:

y/m	$E_2(y)/[dB(\mu V/m)]$
0	79.9
10	77.9
20	76.0
30	73.1
40	69.7
50	66.5

只考虑第三相产生的电晕

$$|\Gamma|_3 = \begin{vmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ 128 \end{vmatrix} \quad (\mu A/m^{\frac{1}{2}})$$

和前面相同的方法,电场强度 $E_3(y)$ 为:

y/m	$E_3(y)/[dB(\mu V/m)]$
0	71.1
10	74.1
20	75.1
30	72.3
40	68.5
50	63.1

总的电场强度的计算

根据 CISPR 的规则,总的电场强度水平为:

y/m	$E(y)/[dB(\mu V/m)]$
0	79.9
10	77.9
20	77.1
30	74.2
40	70.6
50	67.1

E_1, E_2, E_3 和总的场强的横向场强分布如图 B.2 所示。

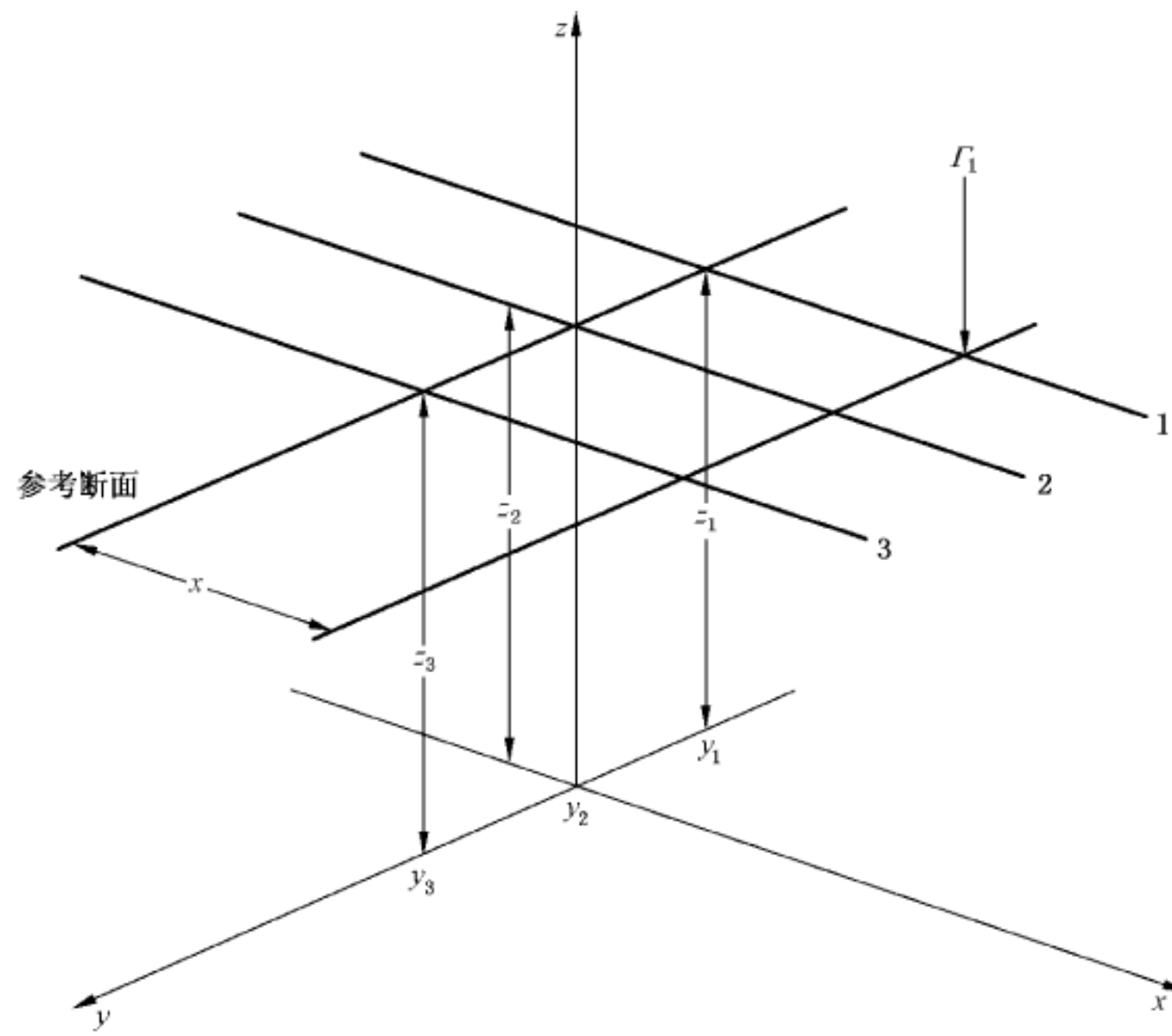
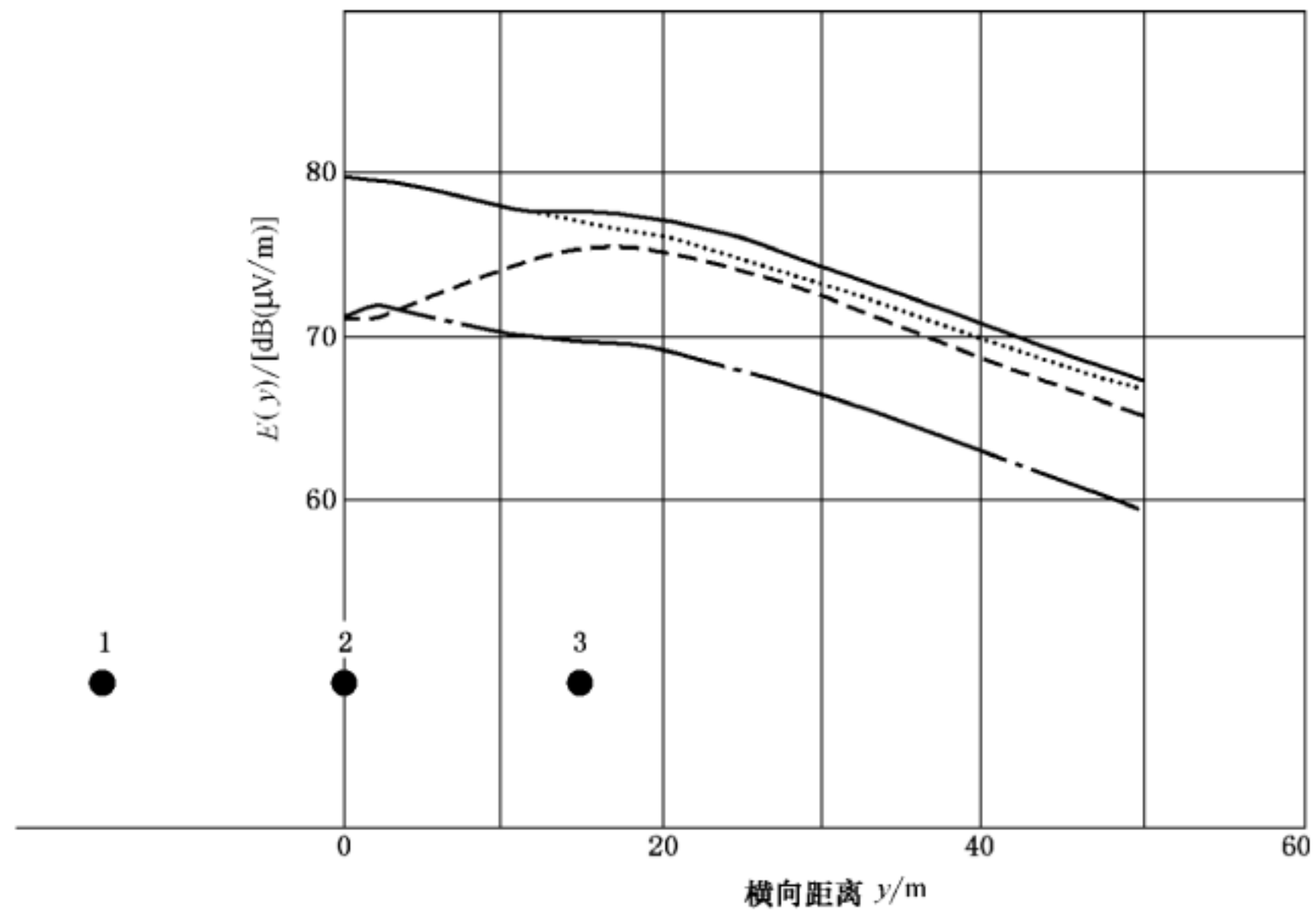


图 B.1 简化分析方法的几何量的示意图



说明：

- : 第 1 相；
-: 第 2 相；
- · - ·: 第 3 相；
- : 总和。

图 B.2 给定示例的计算结果：单相导线产生的无线电噪声场强横向分布曲线和总的场强分布曲线

参 考 文 献

- [1] Project EHV; General Electric Company, EHV transmission line reference book, Edison Electric Institute NY 1968, Chapter V, pp.173-214.
- [2] Y. Sawada; Calculating Method of Radio Noise Level and Its Application to Design of AC power Transmission Line, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.89, pp.844-853, May/June 1970.
- [3] Y.Sawada, T.Sugimoto, M.Ushirozawa; Radio Noise and Corona Loss of 500 kV Power Transmission Line and Substation, CRIEPI Report No.7 (Japanese), Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI), Japan, June 1970.
- [4] J.J.Clade, C.H.Gary, M.R.Moreau; Usage and Checking of the Theoretical Relations Between Fields, Currents, and Excitation Functions in Radio Frequencies in the Case of Short Test Lines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.88, pp.1501-1511, October 1969.
- [5] CIGRÉ-IEEE Committee Report: Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRÉ-IEEE Survey Results, IEEE Transactions on PAS, May/June 1973, vol.92, pp.1029-1042.
- [6] Addendum to "Interferences Produced by Corona Effect of Electric Systems (Description of the phenomena and practical guide for calculation)".By CIGRÉ WG on Corona and Field Effects.To be published as CIGRÉ Brochure.
- [7] R.G.Olsen, S.D.Schennum, V.L.Chartier; Comparison of several methods for calculating power line electromagnetic interference levels and calibration with long term data.IEEE Transactions on Power delivery, Vol.7, No.2, April 1992.
- [8] R.D.Dallaire, P.Sarma Maruvada; Analysis of radio interference from short multiconductor lines.Part 1: Theoretical analysis.IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-100, No.4, April 1981.
- [9] R.D.Dallaire, P.Sarma Maruvada; Analysis of radio interference from short multiconductor lines.Part 1: Analytical and test results.IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.4, April 1981.
- [10] B.A. Cauzillo, R.Cortina, P.Nicolini, J.C.De Medeiros, M.E.Bryant; Design criteria of UHV lines based on experience acquired in the 1 000 kV Project.CIGRÉ 22-14, 1984.
- [11] Y.Sawada, M.Fukushima, M.Yasui; Akagi 1 000 kV Project in CRIEPI.Corona test facilities and results up to 1983.CIGRÉ 36-05, 1984.
- [12] M.Fukushima, T.Sasano, Y.Sawada; Corona performance of conductor bundles measured in corona cages and its application.CIGRÉ Symposium 22-81, No.232-01, June 1981.
- [13] P.Z.Rokhinson, A.S.Sokhransky, L.V.Timashova, N.N.Tykhodeev; Corona effects of high bundle number UHV conductors: energy losses, radio and TV interference.CIGRÉ 36-09, 1988.
- [14] Table 4.1 in 'Interferences produced by corona effect of electric system: Description of phenomena practical guide for calculation', by CIGRE WG36.01 in 1974.

[15] Muno Ju, Kwangho Yang, Sungho Myung, Kooyong Shin, Dongil Lee, “Development of New Formulas for Predicting Corona Noise from HVAC Transmission Lines”, ICEE 2002 pp.2147-2150, 2002.

[16] CIGRE WG36.01, Interferences produced by corona effect of electric systems—Description of phenomena practical guide for calculation, December 1996.
