

对流层通信电路传输损耗的预算

〔美〕P.L. 赖斯 等 编

川 渤 译

内 容 简 介

这是美国环境科学服务局 (ESSA) 电信科学和高空大气物理研究所 (以前为美国国家标准局中央电波传播研究所) 出版的一个报告。这个报告专门论述对流层通信电路传输损耗的计算, 包括对流层前向散射电路, 各种类型的绕射电路以及视距通信电路。不仅给出了便于数字计算机使用的公式, 而且还附有大量的图表。这些图表曲线是根据大量的测试数据作出来的, 具有较大的实用价值。原报告分为第一, 第二两卷, 翻译时把原第一卷作为正文, 第二卷作为附录。此外在翻译时对原文中个别错误作了改正。

本书可作为通信工程设计人员的参考手册, 也可供从事电波传播工作的科技人员参考。

Transmission Loss Predictions for Tropospheric Communication Circuits

P. L. Rice, A. G. Longley, K. A. Norton, and A. P. Barsis

U. S. Department of Commerce

National Bureau of Standards, 1967.

*

对流层通信电路传输损耗的预算

〔美〕P. L. 赖斯 等 编

川 渤 译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张 17 1/2 406千字

1975年9月第一版 1975年9月第一次印刷 印数: 0,001—3,800册

统一书号: 15034·1432 定价: 1.80元

(只限国内发行)

译 者 的 话

对流层散射电路传输损耗的计算，国际上已有大量文献发表。但多数是偏重于理论推导，较难直接适合工程应用。有些文献给出了工程计算公式，但或者由于方法过于粗略，或者由于所根据的实验数据不多，实用价值不大。由诺顿（Norton）等人编写的这份报告，以大量的实验材料为基础，总结出了计算对流层散射电路传输损耗的方法，在国外发表的类似文献中，要算是一份比较实用的材料。我们本着“洋为中用”的精神，把它翻译过来，希望对通信工作者能有一定的参考价值。

这份报告最初于1955年发表，以后由于对流层散射计算方法的发展，以及对大气层折射指数结构更深入的了解，进行了两次修订。其初稿曾于1962年作为美国第五研究组的成果向国际无线电咨询委员会（CCIR）提出过。本书是根据1967年1月第二次修订版译出来的。文中以讨论对流层散射传输损耗为主，同时还包括了平滑球地面和不规则地形上的绕射传播、孤立楔形障碍物和圆形障碍物绕射等的传输损耗的计算。为了考虑气象条件对传输损耗的影响，文中对经常遇到的气象条件进行了分类，针对不同的气象条件，给出了不同的计算方法和图表。

原文编著者是资产阶级学者，他们的资产阶级观点难免要在书中流露，望读者批判地汲取其中有益的东西。原文中有些明显的技术性错误，已就译者所知作了改正。由于我们水平不高，谬误之处，在所难免，欢迎批评指正。

目 录

第一章 前言	7
第二章 系统损耗、传输损耗、路径天线增益和路径天线功率增益的概念	9
2.1 系统损耗和传输损耗	9
2.2 天线方向性增益和功率增益	10
2.3 极化耦合损耗和多径耦合损耗	11
2.4 路径损耗、基本传输损耗、路径天线增益和相对于自由空间传播的衰减	12
第三章 大气的吸收	14
3.1 水汽和氧的吸收	14
3.2 空间噪声温度	17
3.3 降雨的衰减	19
3.4 云的衰减	23
第四章 等效地球半径的确定	29
第五章 视距路径传输损耗的预算方法	29
5.1 不规则地面上的视距传播	29
5.2 平滑的或均匀粗糙的球形地面上的视距传播	30
5.2.1 拟合地形的曲线	32
5.2.2 地形粗糙度因子 σ_h	33
5.3 杂乱地物的某些效应	33
5.4 视距路径预算举例	34
第六章 超视距路径角距离的确定	39
6.1 大圆路径图的绘制	39
6.2 地形剖面图的绘制和无线电视线障碍物位置的确定	40
6.3 超视距路径等效天线高度的计算	40
6.4 角距离 θ 的计算	41
第七章 单个孤立障碍物上的绕射	50
7.1 无地面反射的单个楔形障碍物	50
7.2 有地面反射的单个楔形障碍物	51
7.3 无地面反射的孤立圆形障碍物	51
7.4 有地面反射的孤立圆形障碍物	52
7.5 孤立圆形障碍物传输损耗预算举例	53
第八章 平滑地面上和不规则地形上的绕射	62
8.1 平滑地面上的绕射损耗	62
8.2 不规则地形上的绕射	63
8.2.1 $d_{t,t} \approx d_{s,r}$ 的路径上的绕射	66
8.2.2 水平极化	69
8.3 非孤立障碍物的共视线点路径	69

第九章 前向散射传播	71
9.1 衰减函数 $F(\theta d)$	71
9.2 频率增益函数 H_0	72
9.3 散射效率修正项 F_0	73
9.4 前向散射多径耦合损耗的预期值	74
9.5 绕射和散射传输损耗的组合	74
9.6 超视距路径传输损耗预算举例	76
第十章 功率慢衰落	87
10.1 大气层状结构的影响	88
10.2 气候区	89
10.3 等效距离 d_e	91
10.4 函数 $V(0.5, d_e)$ 和 $Y(q, d_e)$	91
10.5 大陆温区	92
10.6 海上温区	94
10.7 其它气候区	94
10.8 楔形绕射路径的慢变化	94
第十一章 参考文献	124
第十二章 符号和缩写表	135
附录 I 现有数据、标准曲线和一种简易预算模型	144
I.1 作为路径长度的函数的现有数据	144
I.2 标准的点对点传输损耗曲线	145
I.3 相对于自由空间传播的衰减的原始参考值 A_{cr}	171
I.3.1 概述	171
I.3.2 地形粗糙度因子 Δh	171
I.3.3 绕射衰减 A_d	171
I.3.4 前向散射衰减 A_s	172
I.3.5 无线电视距路径	173
I.3.6 预算参数的范围	174
I.3.7 计算举例	174
附录 II 接收功率、场强和多径耦合损耗	176
II.1 从接收天线可接收到的功率	176
II.2 传播损耗和场强	177
II.3 多径耦合损耗	180
II.3.1 复矢量场的表述方法	180
II.3.2 主极化和横极化分量	182
II.3.3 单位复极化矢量	182
II.3.4 功率通量密度	183
II.3.5 极化效率	184
II.3.6 多径耦合损耗	185
II.3.7 理想化的理论天线方向图	187
II.3.8 结论	191
II.4 附录 I 专用符号表	192
附录 III 供设计计算机程序用的补充材料和公式	197
III.1 视距传播	197
III.2 单个孤立障碍物绕射	205

III.3 有地面反射的单个孤立障碍物绕射	205
III.4 平滑地面绕射时的参数 K 和 b°	209
III.5 前向散射	210
III.6 天线波束翘高或偏离大圆平面时的传输损耗	221
III.7 功率慢衰落	225
III.7.1 大陆温区的日变化和季变化	226
III.7.2 分布的混合	230
III.8 附录III专用符号表	245
附录IV 前向散射	249
IV.1 一般介绍	249
IV.2 前向散射模型	250
IV.3 附录IV专用符号表	254
附录V 相位干涉衰落和通信概率	256
V.1 衰落的两个分量	257
V.2 纳卡伽密-赖斯 (Nakagami-Rice) 分布	258
V.3 受噪声限制的通信	264
V.4 受干涉限制的通信	264
V.5 同时存在的多个干扰源的联合效应	267
V.6 受噪声限制的通信的系统方程	267
V.7 受干扰限制的通信的时间有效度	269
V.8 预算误差的估计	269
V.9 给定时间有效率 q 后通信概率 Q 的计算	271
V.10 无线电频谱的最佳利用	274
V.11 附录V专用符号表	276

对流层通信电路传输损耗的预算

〔美〕P.L. 赖 斯 等 编

川 渤 译

内 容 简 介

这是美国环境科学服务局 (ESSA) 电信科学和高空大气物理研究所 (以前为美国国家标准局中央电波传播研究所) 出版的一个报告。这个报告专门论述对流层通信电路传输损耗的计算, 包括对流层前向散射电路, 各种类型的绕射电路以及视距通信电路。不仅给出了便于数字计算机使用的公式, 而且还附有大量的图表。这些图表曲线是根据大量的测试数据作出来的, 具有较大的实用价值。原报告分为第一, 第二两卷, 翻译时把原第一卷作为正文, 第二卷作为附录。此外在翻译时对原文中个别错误作了改正。

本书可作为通信工程设计人员的参考手册, 也可供从事电波传播工作的科技人员参考。

Transmission Loss Predictions for Tropospheric Communication Circuits

P. L. Rice, A. G. Longley, K. A. Norton, and A. P. Barsis

U. S. Department of Commerce

National Bureau of Standards, 1967.

*

对流层通信电路传输损耗的预算

〔美〕P. L. 赖斯 等 编

川 渤 译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张 17 1/2 406千字

1975年9月第一版 1975年9月第一次印刷 印数: 0,001—3,800册

统一书号: 15034·1432 定价: 1.80元

(只限国内发行)

译 者 的 话

对流层散射电路传输损耗的计算，国际上已有大量文献发表。但多数是偏重于理论推导，较难直接适合工程应用。有些文献给出了工程计算公式，但或者由于方法过于粗略，或者由于所根据的实验数据不多，实用价值不大。由诺顿（Norton）等人编写的这份报告，以大量的实验材料为基础，总结出了计算对流层散射电路传输损耗的方法，在国外发表的类似文献中，要算是一份比较实用的材料。我们本着“洋为中用”的精神，把它翻译过来，希望对通信工作者能有一定的参考价值。

这份报告最初于1955年发表，以后由于对流层散射计算方法的发展，以及对大气层折射指数结构更深入的了解，进行了两次修订。其初稿曾于1962年作为美国第五研究组的成果向国际无线电咨询委员会（CCIR）提出过。本书是根据1967年1月第二次修订版译出来的。文中以讨论对流层散射传输损耗为主，同时还包括了平滑球地面和不规则地形上的绕射传播、孤立楔形障碍物和圆形障碍物绕射等的传输损耗的计算。为了考虑气象条件对传输损耗的影响，文中对经常遇到的气象条件进行了分类，针对不同的气象条件，给出了不同的计算方法和图表。

原文编著者是资产阶级学者，他们的资产阶级观点难免要在书中流露，望读者批判地汲取其中有益的东西。原文中有些明显的技术性错误，已就译者所知作了改正。由于我们水平不高，谬误之处，在所难免，欢迎批评指正。

目 录

第一章 前言	7
第二章 系统损耗、传输损耗、路径天线增益和路径天线功率增益的概念	9
2.1 系统损耗和传输损耗	9
2.2 天线方向性增益和功率增益	10
2.3 极化耦合损耗和多径耦合损耗	11
2.4 路径损耗、基本传输损耗、路径天线增益和相对于自由空间传播的衰减	12
第三章 大气的吸收	14
3.1 水汽和氧的吸收	14
3.2 空间噪声温度	17
3.3 降雨的衰减	19
3.4 云的衰减	23
第四章 等效地球半径的确定	29
第五章 视距路径传输损耗的预算方法	29
5.1 不规则地面上的视距传播	29
5.2 平滑的或均匀粗糙的球形地面上的视距传播	30
5.2.1 拟合地形的曲线	32
5.2.2 地形粗糙度因子 σ_h	33
5.3 杂乱地物的某些效应	33
5.4 视距路径预算举例	34
第六章 超视距路径角距离的确定	39
6.1 大圆路径图的绘制	39
6.2 地形剖面图的绘制和无线电视线障碍物位置的确定	40
6.3 超视距路径等效天线高度的计算	40
6.4 角距离 θ 的计算	41
第七章 单个孤立障碍物上的绕射	50
7.1 无地面反射的单个楔形障碍物	50
7.2 有地面反射的单个楔形障碍物	51
7.3 无地面反射的孤立圆形障碍物	51
7.4 有地面反射的孤立圆形障碍物	52
7.5 孤立圆形障碍物传输损耗预算举例	53
第八章 平滑地面上和不规则地形上的绕射	62
8.1 平滑地面上的绕射损耗	62
8.2 不规则地形上的绕射	63
8.2.1 $d_{t,t} \approx d_{s,r}$ 的路径上的绕射	66
8.2.2 水平极化	69
8.3 非孤立障碍物的共视线点路径	69

第九章 前向散射传播	71
9.1 衰减函数 $F(\theta d)$	71
9.2 频率增益函数 H_0	72
9.3 散射效率修正项 F_0	73
9.4 前向散射多径耦合损耗的预期值	74
9.5 绕射和散射传输损耗的组合	74
9.6 超视距路径传输损耗预算举例	76
第十章 功率慢衰落	87
10.1 大气层状结构的影响	88
10.2 气候区	89
10.3 等效距离 d_e	91
10.4 函数 $V(0.5, d_e)$ 和 $Y(q, d_e)$	91
10.5 大陆温区	92
10.6 海上温区	94
10.7 其它气候区	94
10.8 楔形绕射路径的慢变化	94
第十一章 参考文献	124
第十二章 符号和缩写表	135
附录 I 现有数据、标准曲线和一种简易预算模型	144
I.1 作为路径长度的函数的现有数据	144
I.2 标准的点对点传输损耗曲线	145
I.3 相对于自由空间传播的衰减的原始参考值 A_{cr}	171
I.3.1 概述	171
I.3.2 地形粗糙度因子 Δh	171
I.3.3 绕射衰减 A_d	171
I.3.4 前向散射衰减 A_s	172
I.3.5 无线电视距路径	173
I.3.6 预算参数的范围	174
I.3.7 计算举例	174
附录 II 接收功率、场强和多径耦合损耗	176
II.1 从接收天线可接收到的功率	176
II.2 传播损耗和场强	177
II.3 多径耦合损耗	180
II.3.1 复矢量场的表述方法	180
II.3.2 主极化和横极化分量	182
II.3.3 单位复极化矢量	182
II.3.4 功率通量密度	183
II.3.5 极化效率	184
II.3.6 多径耦合损耗	185
II.3.7 理想化的理论天线方向图	187
II.3.8 结论	191
II.4 附录 I 专用符号表	192
附录 III 供设计计算机程序用的补充材料和公式	197
III.1 视距传播	197
III.2 单个孤立障碍物绕射	205

III.3 有地面反射的单个孤立障碍物绕射	205
III.4 平滑地面绕射时的参数 K 和 b°	209
III.5 前向散射	210
III.6 天线波束翘高或偏离大圆平面时的传输损耗	221
III.7 功率慢衰落	225
III.7.1 大陆温区的日变化和季变化	226
III.7.2 分布的混合	230
III.8 附录III专用符号表	245
附录IV 前向散射	249
IV.1 一般介绍	249
IV.2 前向散射模型	250
IV.3 附录IV专用符号表	254
附录V 相位干涉衰落和通信概率	256
V.1 衰落的两个分量	257
V.2 纳卡伽密-赖斯 (Nakagami-Rice) 分布	258
V.3 受噪声限制的通信	264
V.4 受干涉限制的通信	264
V.5 同时存在的多个干扰源的联合效应	267
V.6 受噪声限制的通信的系统方程	267
V.7 受干扰限制的通信的时间有效度	269
V.8 预算误差的估计	269
V.9 给定时间有效率 q 后通信概率 Q 的计算	271
V.10 无线电频谱的最佳利用	274
V.11 附录V专用符号表	276

第一章 前 言

本书叙述了用以解释或预算传输损耗累积分布的综合计算方法，这些方法可用于很宽的频率范围，并且几乎对任何地形条件和好几个气候区都适用。传播特性的这种定量估算有助于确定如何使所设计的无线电系统能够避免有害干扰从而满意地工作。因此，这是更有效地利用无线电频谱的重要步骤。

当我们列出在多条路径上测得的传输损耗数据与路径长度的函数关系时，就更清楚地证明了这些综合的和精确的计算方法的必要性。在附录 I 的图 I.1 至图 I.4 中，按距离画出 750 余条路径的相对于自由空间传播的衰减的长期中值。这些数据离散非常大的原因，主要是由于各条路径的地形剖面 and 天线有效高度不同。即使在单独一条路径上，长时间的观测值也显现出差不多大小的变化范围，有时则超过 100 分贝。这样大的路径与路径之间的变化和时间的变化必须予以认真的考虑，尤其当同一信道或邻近信道系统之间可能存在干扰时，更是如此。附录 I 给出了一种如何获得范围很宽的预报参数的传输损耗初步参考值的方法。

这里叙述的精细的点对点方法与传播路径几何图形、地表面附近的大气折射指数和天线方向性的特性等有关。在 40~10000 兆赫频率范围内，对它们进行过测量检验。由大气层各种成分对无线电能量的吸收和散射所引起的衰减的估计也包括在内，以期把这些方法的应用推广到 100 千兆赫的频率。

传输损耗长期的参考中值的计算是根据目前流行的电波传播理论。使用了大量的无线电数据以得出预报长期中值的地区变化、季节变化和昼夜变化的经验方法。给出了几个气候区和一些时期的相对于观测中值的慢衰落的估算，其中包括一些只有少量观测数据的那些地区。

视距路径的传输损耗计算是根据几何光学射线理论。对于有公共无线电视线点的路径，使用了菲涅耳-克希霍夫 (Fresnel-Kirchoff) 楔形体绕射理论，并加以引伸以预算跨越孤立圆形障碍物的绕射衰减。对于稍微超视距的具有双视线点的路径，使用改进了的范德堡-布雷梅尔 (Van der Pol-Bremmer) 方法来计算远绕射区的场强。对于远超过视距的更长的路径，则用前向散射理论进行预算。使用了无线电数据来估算大气层各个高度上的散射效率。对于哪一种传播机理为主还弄不清楚的地方，传输损耗就用两种方法来计算，并且综合两种计算结果。

表明如何计算视距路径、孤立圆形障碍物和超视距长路径的传输损耗的例子，分别在第五、第七和第九章论述。第十二章给出本书中使用的符号和缩写表。有些仅在某一附录中使用的特别符号，则在相应的附录的末尾给予说明。

附录 I 中包括一套用本书叙述的方法计算的基本传输损耗的“标准”曲线，以及表明地球-空间通信中在自由空间传播损耗值以下的衰减曲线。这些曲线和示于图 I.1 至图 I.4 的数据中值可用于一般的定性分析，其中很明显地没有考虑在一给定路径中将遇到的特殊

地形剖面或气候的影响。

附录 I 是对第二章的传输损耗和天线方向性增益论述的补充。该附录还包括关于天线波束取向、极化和多径耦合损耗的讨论。

附录 II 讨论特殊路径的情形，包括计算有地面反射的视线传输损耗的精确公式，以及用于天线波束上翘或指向大圆平面以外的经过改进的公式，还给出了适合于数字计算机使用的解析式。

附录 IV 评述对流层传播的理论，着重讨论大气湍流、层或小的随机取向的面引起的前向散射的机理。还给出了这方面的参考文献。

附录 V 讨论与“功率慢衰落”相对比的“相位干涉衰落”的问题，给出在有噪声和干扰信号时获得满意工作的概率的计算方法，还简要地论述了如何实现无线电频谱最佳利用的途径。

美国国家标准局技术报告第 95 号至 103 号曾经介绍过对流层传播现象及其建站问题^[184]，某些气象学现象及其对对流层传播的影响^{(89)、(90)}，无线电气象学⁽²⁸⁾，大气折射率测量技术⁽¹⁴⁴⁾，系统参数的确定⁽⁹⁸⁾，通信电路的性能预报⁽¹⁵⁾以及设备特性⁽¹²⁾。

第二章 系统损耗、传输损耗、路径天线

增益和路径天线功率增益的概念

在国际无线电咨询委员会 341 号推荐书中, 对系统损耗 L_s 、传输损耗 L 、传播损耗 L_p 、基本传输损耗 L_b 、路径天线增益 G_p 和路径天线功率增益 G_{pp} 作了定义。本章再次叙述一下这些定义, 并引入“路径损耗” L_o 的定义, 说明这些术语和概念的用法, 还介绍了它们的测量方法^{〔170〕、〔244〕}。这里用的符号与 341 号推荐书和 112 号报告^{〔52〕、〔53〕}中用的符号稍有差别。由于天线增益及天线回路电阻实际上等于自由空间中的值, 因此对于本文所涉及的频率范围来说, 几乎在所有的情况下都把系统损耗、传播损耗和传输损耗之间的差别忽略不计, 而把它们看作是相等的。

2.1 系统损耗和传输损耗

在一条由发射天线、接收天线和中间传播介质所组成的无线电电路中, 系统损耗可定义为无因次比值 w'_i/w'_a , 其中 w'_i 是输入到发射天线端子的射频功率, w'_a 是自接收天线端子所获得的射频信号功率。系统损耗通常以分贝表示:

$$L_s = 10 \log(w'_i/w'_a) = W'_i - W'_a \text{ (分贝)} \quad (2.1)$$

(除另有说明外, 本书所有的对数均以 10 为底)。

L_s 包括了地面和电介质损耗以及天线回路损耗, 它能直接而准确地被测量出来。然而在传播研究中, 采用诸如传输损耗和基本传输损耗这样一些有关的量是很方便的, 这些量只能从各种假设情况下的辐射功率和接收功率的理论估算中推导出来。

本书中大写字母通常用以表示下脚标所指的相应数值的比值, 用分贝 (db), 分贝微伏 (dbμ), 或分贝瓦 (dbw) 表示。例如, 公式 (2.1) 中, $W'_i = 10 \log w'_i$, 单位为分贝瓦, w'_i 的单位为瓦。

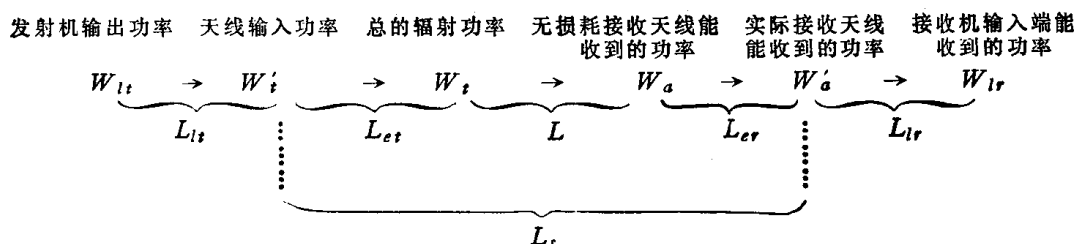
传输损耗可定义为无因次比值 w_i/w_a , 其中 w_i 是在某一给定的射频频段内由发射天线辐射的总功率; w_a 是从等效无损耗天线所能获得的射频信号功率。传输损耗通常以分贝表示:

$$L = 10 \log(w_i/w_a) = W_i - W_a = L_s - L_{et} - L_{er} \text{ (分贝)} \quad (2.2)$$

$$L_{et} = 10 \log l_{et}, \quad L_{er} = 10 \log l_{er} \quad (2.3)$$

式中, $1/l_{et}$ 和 $1/l_{er}$ 如附录 I 所定义, 分别为发射天线的功率辐射效率和接收天线的接收效率。对于对流层通信电路一般所用的频率和天线高度来说, 这些效率都接近于 1, 所以 L_s 和 L 之间的差别是可以忽略不计的。当天线离地面高度不到一个波长 (通常是在较低的频率), 尤其是使用水平极化时, L_{et} 和 L_{er} 不能忽略, 而且受到地面和天线邻近的周围环境的影响很大。

从发射机输出端到接收机输入端, 采用了如下的符号:



值得注意的是, L_{lt} 和 L_{lr} 在概念上是不同的。因为 W_{lt} 和 W'_t 分别表示发射机输出和发射天线输入的功率, 所以 L_{lt} 包含了传输线损耗和失配损耗。 W'_a 和 W_{lr} 分别表示在接收天线和在接收机能够获得的功率, 但因为 L_{lr} 仅包括天线和接收机之间的传输线损耗, 所以失配损耗必须单独计算。接收功率和有效损耗因子将在附录 I 中讨论。

2.2 天线方向性增益和功率增益

如果: (1) 位于球心的发射天线通过任意大的球面辐射总功率 w , 瓦; (2) 发射天线在 $\hat{r}$ 方向上每单位立体角辐射 $g_r w / (4\pi)$ 瓦的功率, 则这个发射天线在单位矢量 $\hat{r}$ 方向上的方向性增益为 $g'_r(\hat{r})$ 。

如果: (1) 输入到天线端子的功率为 $w'_t = l_{et} w$; (2) 天线在 $\hat{r}$ 方向上每单位立体角辐射 $g'_r w'_t / (4\pi)$ 瓦的功率, 则同一副天线在 $\hat{r}$ 方向上的功率增益为 $g'_r(\hat{r})$ 。

由于存在损耗因子 l_{et} , 天线功率增益 g'_r 小于方向增益 g_r 。用相对于各向同性辐射器的增益的分贝表示, 其关系为:

$$G_r(\hat{r}) = G'_r(\hat{r}) + L_{et} \quad (2.4a)$$

其中天线功率增益 $G'_r(\hat{r})$ 比天线方向增益 $G_r(\hat{r})$ 小 L_{et} 分贝, 这里的功率辐射效率 $1/l_{et}$ 与方向 $\hat{r}$ 无关。

一副天线, 无论是用作发射还是用作接收, 其增益都是相同的。对于接收天线来说, 方向增益 $G_r(\hat{r})$ 和功率增益 $G'_r(\hat{r})$ 的关系为:

$$G_r(\hat{r}) = G'_r(\hat{r}) + L_{er} \quad (2.4b)$$

本书以后讨论的都是方向增益, 因为功率增益只需减去 L_{et} 或 L_{er} 即可求得。方向增益 $G(\hat{r})$ 的最大值简单地用 G 表示。如附录 I 所指出的, 有时宜于将方向增益分为主极化分量和横极化分量。

在自由空间中, 对于具有半功率半波束宽度 δ (单位为度, 即弧度) 和圆形波束截面的理想天线来说, 可以假定它将 $x\%$ 的功率通过面积为 $\pi\delta^2$ 的单位半径的球面上各向同性地辐射出去, 而将 $(100-x)\%$ 的功率通过球面的其余部分各向同性地辐射出去。在这种情况下, 主波束方向上辐射的功率就等于每单位立体角 $xw / (100\pi\delta^2)$ 瓦; 而根据定义, 最大增益 g 就等于 $4\pi x / (100\pi\delta^2)$ 。假设 10 分贝锥形照射的抛物面反射器的波束立体角效率 $x = 56\%$, 则 $g = 2.24/\delta^2$ 。这样, 相对于各向同性辐射器, 最大的自由空间增益 G (分贝) 就等于:

$$G = 10 \log g = 3.50 - 20 \log \delta \text{ (分贝)} \quad (2.5)$$

假设水平和垂直波束宽度 $2\delta_w$ 和 $2\delta_z$ 是不相等的, 则:

$$\delta = \sqrt{\delta_w \delta_z} \quad (2.6)$$

上述的分析对于测量出的天线辐射图是有用的。

对于那些口径外形明确的天线,例如,喇叭或抛物面反射器,天线口径效率的概念是有用的。譬如说,口径效率为56%、直径为 D 的抛物面反射器在自由空间的最大增益就是其面积的56%与各向同性辐射器的有效吸收面积之比:

$$G = 10 \log \left[\frac{0.56\pi D^2/4}{\lambda^2/4\pi} \right] = 20 \log D + 20 \log f - 42.10 \text{ (分贝)} \quad (2.7)$$

式中, D 和 λ 单位为米, f 是射频频率,单位为兆赫。只有当天线波束立体角效率或口径效率已知时,公式(2.5)、(2.7)才能用来求实际天线的增益,但要求得它们的精确值只能通过测量。

例如,当采用偶极子馈源,而且在 $10 < D/\lambda < 25$ 时,实验表明,下述经验公式要优于公式(2.7):

$$G = 23.3 \log D + 23.3 \log f - 55.1 \text{ (分贝)} \quad (2.8)$$

式中, D 以米为单位, f 以兆赫为单位。

参考文献[69]发表了求抛物面天线最大增益的诺谟图,它作为馈源方向图和角口径的函数给出。在最新出版的参考文献[121]和[220]中讨论了各种常用天线。

对所用天线在最大辐射或接收方向上的振幅、相位和极化特性的了解要比在其他方向上的了解多得多。大多数理论工作和研制工作集中于如何减少天线之间的传输损耗和研究任意天线对标准平面波的响应。但是,为了抑制无用信号,日益增多的注意力正集中于研究使天线间的传输损耗为最大。为此,重要的是要能指明(有时以统计方法指明)在每一个可能出现无用信号的多径分量方向上天线的方向性、相位和极化特性。附录I中大部分是讲这一问题的。

就本书感兴趣的频率范围而言,在任一无线电频率 ν 赫时的天线辐射阻抗 r_v ,通常都是假设与天线周围的环境无关,要不然就应将天线附近环境看作天线本身的一部分,譬如,当天线装在飞机或空间飞行器上的时候就是如此。

2.3 极化耦合损耗和多径耦合损耗

有些时候需要减少接收天线对于发自同一信号源但由不同路径来的无用信号的响应。这就需要注意由不同方向到达的多个电波的振幅、极化以及相对相位特性。在任何一种理论模型中,都必须考虑到每一电波的主要极化分量和横向极化分量的相位,以及接收天线对每个分量的相对相位响应特性。在天线端加上复数电压就是为了适当考虑这一振幅和相位信息。

在附录I中表明了如何采用复矢量 $\vec{e}$ 和 $\vec{e}_r$ 来表示发射天线的辐射方向图和接收天线的接收方向图,这种方向图包含了对于给定自由空间波长 λ 的振幅、极化和相位的信息^[128]。在复矢量 $\vec{e} = \vec{e}_p + i\vec{e}_s$ 的符号下面用了一条横线,其中 $i = \sqrt{-1}$, $\vec{e}_p$ 和 $\vec{e}_s$ 是实矢量,分别与均匀的椭圆极化平面波的主要极化分量和横向极化分量相对应。

计算在自由空间中两副天线之间的功率传输时,可为每一副天线确定复极化矢量 $\hat{p}(\hat{r})$ 和 $\hat{p}_r(-\hat{r})$,就好像一个是发射机,另一个是接收机。每副天线都必须在另一副天线的远场或辐射场中。电场 $\vec{e}$ 的极化方向是右旋的还是左旋的,这就要看极化椭圆的轴比 a_x 是正的还是负的: