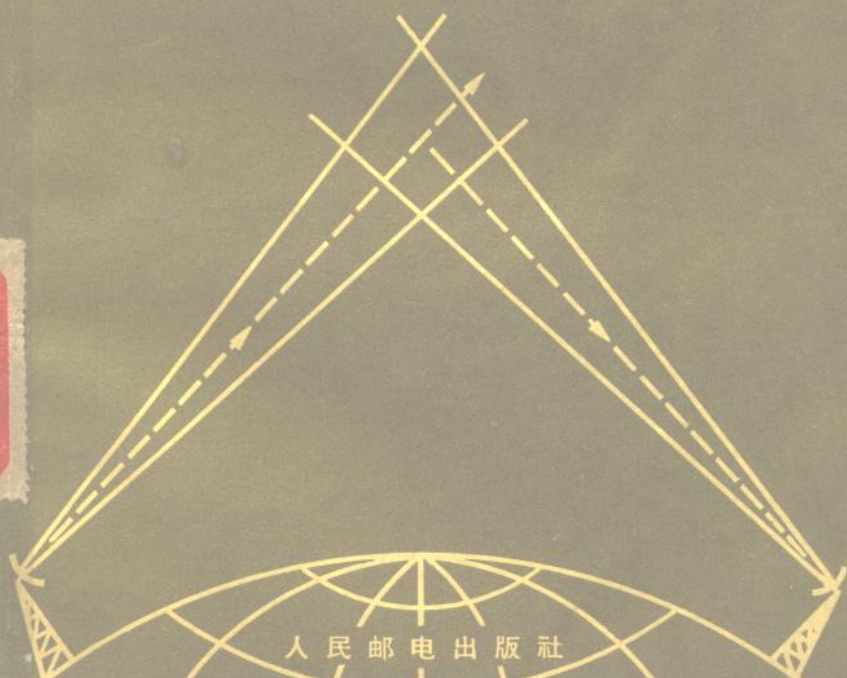


超短波远距离传播

苏联 M. П. 多路哈諾夫 著

袁 翊 譯



人民邮电出版社

超短波远距离传播

苏联 M. П. 多路哈諾夫 著

袁 翊 譯

人民邮电出版社

М. П. ДОЛУХАНОВ
ДАЛЬНЕЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЕ
УЛЬТРАКОРОТКИХ
ВОЛН
СВЯЗЫЗДАТ 1962

内 容 提 要

本书是叙述超短波远距离传播问题的专门著作。全书共分十二章，討論超短波通信线路的计算原则和各种远距离超短波传播的形式及宇宙通信等问题。对一般无线电工程技术人员、大学无线电系的教师和学生及电波传播方面的研究人员均有参考价值。

超 短 波 远 距 离 传 播

著 者： 苏联 М. П. 多路哈諾夫

譯 者： 袁 翊

出版者： 人 民 邮 电 出 版 社

北京东四 6 条 13 号

(北京市书刊出版业营业登记证出字第〇四八号)

印刷者： 北 京 市 印 刷 一 厂

发行者： 新 华 书 店

开本 787×1092 1/32

1964 年 7 月北京第一版

印张 6 8/32 页数 100

1964 年 7 月北京第一次印刷

印刷字数 141,000 字

印数 1—7,150 册

統一书号:15045·总1387—无384

定价：(科 7) 0.90 元

譯 者 序

本书是叙述超短波远距离传播問題的专门著作。全书共分十二章，其中第一章討論超短波通信綫路的計算原則，第二章至第十一章論述十种远距离超短波传播的形式，第十二章討論宇宙通信問題。

这本书內容比較丰富，几乎介紹了目前已知的各种超短波远距离传播形式，讲来浅显易懂，并附有不少例題，进一步帮助讀者理解和学习。

本书对一般无綫电工程技术人員，大学无綫电系的教师和学生及电波传播方面的研究人員均有参考价值。

譯者在忠于原意和力求譯文通順的前提下，尽量保持了原文的語气和风格。书末并附有俄、中文单詞及詞組对照表，供讀者查考。

全书譯稿承侯景韓、袁志范两位同志协助整理和校核，謹于此表示感謝。

譯者学識浅薄，对譯文虽做过反复修改，难免还有錯誤和不当之处，欢迎讀者指正。

譯者 1963 年 10 月于北京

07462

序 言

远距离传送大量的信息，是现代技术的最迫切任务之一。

用无线电技术的方法来解决这个问题，在利用超短波波段的情况下是有可能的。因为这个波段巨大的频率容量可供传送宽频带的消息。

在过去很长的时间里，认为超短波只能用以保持近距离通信。只是在近几年，一方面由于应用了某些初看起来似乎意义不大的传播特性；另一方面由于火箭技术的成就，才建成了远距离超短波无线电通信干线。

本书研究目前已知的、利用超短波远距离传播过程实现远距离传送信息的方法。

书中研究的所有超短波通信线路的计算方法，大都系以应用“传播损耗”的概念为其基础。书中引用具体的数字实例来阐明所推荐的计算方法，对于掌握所述内容大有裨益。

书中所附的符号表使读者便于应用本书。但由于书中涉及的问题较广，并且不希望改变通用的符号，因而同一个字母不得不用来代表不同的量。书中还引入了用以表示以1瓦为参考电平的功率的分贝数的专门符号——分贝，瓦。

本书主编 Н. В. 奥西巴夫(Н. В. Оси́пов)同志非常认真地审阅了手稿，并提出了许多宝贵的意见和建议，谨向他表示深切的感谢。

作者

符 号 表

$a=6370$ 公里——地球半径	E_m ——电波的电场强度峰值
$a_A=1738$ 公里——月球半径	f ——频率
$a_c=695500$ 公里——太阳半径	f_1 ——发射频率
$a_{\text{地球}}$ ——地球等效半径	f_2 ——接收频率
A ——月球轨道长半轴	f_{kp} ——临界频率
A ——天体方位角	f_N ——等离子区频率
A_1 ——发射天线的有效面积	F ——衰减因子
A_2 ——接收天线的有效面积	F ——引力
b ——弗累涅尔第一区半径	$F_{\partial u \phi p}$ ——在平整地面上绕射传播时的 衰减因子
b ——电离层厚度	F_{npen} ——绕过障碍时的衰减因子
B ——亮度	F_{Hcnp} ——场强的衰减因子
B ——月球轨道短半轴	F_u ——离心力
B ——比例系数	$F(K)$ ——起伏的空间谱
$c=3 \cdot 10^8$ 米/秒——在自由空间中的光速	g ——对流层波导的相对高度
c_y ——无线电波的相速	h ——天体高度
$C(\rho)$ ——相关函数	h_1 ——发射天线高度
d ——线路长度	h_2 ——接收天线高度
d ——直径	h_0 ——球截高度
d_s ——天线有效直径	h_0 ——地面对流层波导高度
D_1 ——发射天线增益	H ——在绕射公式中的高度标准
D_2 ——接收天线增益	H ——障碍高度
$D(\varphi, \theta)$ ——在 (φ, θ) 方向的天线增益	H ——散射区的高度
$e=1.602 \cdot 10^{-19}$ 库——电子的电荷	H ——人造地球卫星的运行高度
$e=2.71828$ ——自然对数的底	H_{np} ——地球磁场的纵向分量
e ——月球轨道的偏心率	i ——电流瞬时值
e ——空气的绝对湿度	i_m ——电流峰值
E ——电波的电场强度瞬时值	I_N ——在单元面积法线方向的单位立体角内的发射功率
E_0 ——电波的电场强度有效值	

I_{θ} ——在和法綫成 θ 角方向的单位立体角内的发射功率	n ——电子总数
$k=1.38 \cdot 10^{-23}$ 瓦/度·赫 = -228,9 分貝,瓦/度·赫	N ——电子密度
——波茨曼常数	N ——折射指数
$k=\frac{2\pi}{\lambda}=\frac{\omega}{c}$ ——波因子	N ——接收设备的噪声系数
$k=6.67 \cdot 10^{-11}$ 立方米/公斤·秒 ² ——引力常数	N ——地带号(按地带計算时间时)
$K=\frac{2\pi}{\lambda}$ ——空間脉动的波因子	P ——或然率
l ——地理經度	P ——橢圆参数
l ——在等离子区内的路程	P ——气压
l ——湍流的平均长度	P_1 ——发射功率
l_1, l_2, l_3 ——方向余弦	P_2 ——接收功率
l_1, l_2 ——到障碍物的距离	$P_{ш}$ ——噪声功率
L ——在繞射公式内的距离标准	$P(E_{\mu\mu})$ ——場强超过 $E_{\mu\mu}$ 的或然率
$L=\frac{P_1}{P_2}$ ——传播損耗	q ——电荷的綫密度
L ——对流层中旋渦的长度	q ——考虑宇宙噪声影响的因子
L_1 ——沿着电离遺跡的弗累涅尔第一区的长度	q ——視差角
L_0 ——传播基本損耗	Q ——电荷
L_0 ——旋渦的最大长度	r ——距离, 通信綫路长度
$L_{св}$ ——自由空間中的传播損耗	r_0 ——視綫距离
$L_{осв}$ ——自由空間中的传播基本損耗	R ——至月球或人造地球卫星的距离
L_s ——旋渦的最小长度	c/u ——信号噪声比
$m=9.106 \cdot 10^{-31}$ 公斤——电子质量	s ——恒星时间
m ——人造地球卫星的质量	S ——波印庭向量
m ——本地时间	S ——面积
m_1, m_2, m_3 ——方向余弦	S_1 ——用一付天綫接收时通信中断的或然率
M ——地球质量	S_2 ——用两付分集天綫接收时通信中断的或然率
n ——折射系数	S_n ——用 n 付分集天綫接收时通信中断的或然率
	S_0 ——格林威治半夜时的恒星时间
	t ——时间
	t ——天体时角
	T ——绝对温度, °K

T ——人造地球卫星的旋轉周期	Δf ——通頻帶寬度
T_3 ——地球晝夜的長度	ΔF ——由於障礙而引起的增益
T_3 ——地球的噪聲溫度	$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$ 法/米——自由空間的
T_M ——月球的旋轉周期	介電系數
T_K ——宇宙空間的噪聲溫度	ϵ' ——土壤的相對介電系數
T_C ——太陽的噪聲溫度	η ——角度
T_9 ——等效噪聲溫度	Θ ——球座標系中的角座標
$T_{\text{эфф}}$ ——天綫的有效噪聲溫度	Θ ——極角
$T(\varphi, \Theta)$ ——在 (φ, Θ) 方向的周圍媒質	Θ ——入射角
的等效溫度	Θ ——散射角
$U(x)$ ——在繞射公式中和距離有關的	λ ——波長
衰減因子	λ ——機械振動的波長
v ——速度	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ 亨/米——自由空間的導磁
v_3 ——地面上點的綫速度	系數
V ——體積	ν ——電子與中性分子的碰撞頻率
V_R ——射綫速度	ρ ——電荷體積密度
$V(y)$ ——繞射公式中的高度因子	ρ ——在對流層中兩點間的距離
π ——座標	σ ——有效散射面積
$\pi = \frac{r}{L}$ ——相對距離	σ' ——有效散射面積率
y ——座標	τ ——密流星遺跡的時間常數
$y_1 = \frac{h_1}{H}$ ——發射天綫的相對高度	φ ——球座標系中的角座標
$y_2 = \frac{h_2}{H}$ ——接收天綫的相對高度	φ ——緯度
Z ——座標	φ ——極化平面的偏轉角
α ——極化角	Φ ——地心角
α ——天體赤經	ψ ——人造地球衛星軌道對赤道平面的
$\alpha_{\text{верт}}$ ——在垂直平面中方向性圖的寬	傾斜角
度	$\omega = 2\pi f$ ——角頻率
$\alpha_{\text{гор}}$ ——在水平平面中方向性圖的寬度	Ω ——和理想化了的方向性圖相應的
β ——滑角或仰角	立體角
δ ——天體赤緯	Ω_c ——立體角(在它的範圍內可以看見
δ ——衰耗系數	太陽)

目 录

译者序

序言

符号表

第一章 引言.....	1
§ 1.1. 基本概念	1
§ 1.2. 超短波无线电通信线路的计算原理	3
第二章 视线距离外超短波绕射传播	11
§ 2.1. 绕射公式	11
§ 2.2. 无线电波绕射传播时衰减因子的决定	12
§ 2.3. 无线电波绕射传播时通信距离的决定	15
第三章 超短波在山峯附近的绕射。“障碍增益”现象	19
§ 3.1. “障碍增益”现象的初步解释	19
§ 3.2. 在传播道路上有屏蔽障碍时衰减因子的近似算法	20
第四章 超短波在电离层的正常结构和不稳定结构上的 远距离反射传播	23
§ 4.1. 电离层的各正常分层在超短波远距离传播中的作用	23
§ 4.2. 电离层中各种不稳定结构在超短波远距离传播中的作用	24
第五章 当产生对流层波导时的超短波远距离传播	25
§ 5.1. 基本概念	25
§ 5.2. 在对流层波导条件下传播时衰减因子的决定	29
§ 5.3. 在超折射条件下传播时的临界波长概念	33
§ 5.4. 产生对流层波导的条件	34
第六章 超短波远距离对流层散射传播	36
§ 6.1. 由于对流层散射引起的超短波远距离传播的物理过程	36
§ 6.2. 对流层散射通信线路损耗计算概述	42
§ 6.3. 有效比散射面积的决定	46
§ 6.4. 有效地参与散射的对流层体积的决定	57
§ 6.5. 对流层无线电波传播的某些特点	65

§ 6.6. 对流层通信线路的工程计算方法	76
第七章 超短波远距离电离层散射传播	79
§ 7.1. 超短波远距离电离层散射传播的物理过程	79
§ 7.2. 有效比散射面积的决定	81
§ 7.3. 散射体积的决定	82
§ 7.4. 电离层散射时的传播损耗	84
§ 7.5. 超短波远距离电离层散射传播的特点	85
§ 7.6. 电离层散射通信线路的工程计算方法	89
第八章 超短波远距离流星电离遗迹散射传播	91
§ 8.1. 由流星电离遗迹散射所引起的超短波远距离传播的物理过程	91
§ 8.2. 无线电波由疏流星遗迹的散射	93
§ 8.3. 无线电波由密流星遗迹的反射	100
§ 8.4. 关于流星反射的相对强度和相对时间的统计数据	102
§ 8.5. 流星无线电通信线路的计算	104
第九章 远距离超短波月球表面反射传播	107
§ 9.1. 应用月球表面反射信号以实现无线电通信的一般原则	107
§ 9.2. 关于月球表面反射特性的实验数据	115
§ 9.3. 月球通信线路上无线电波传播的特点	119
§ 9.4. 月球无线电通信线路的计算基础	126
§ 9.5. 通信线路两终端点同时看到月球时间的决定	129
§ 9.6. 月球角座标的决定	130
第十章 超短波远距离太阳反射传播	133
§ 10.1. 无线电波从太阳大气层反射时的物理过程	133
§ 10.2. 关于应用太阳反射的超短波通信线路的计算意见	136
第十一章 应用人造地球卫星(ИСЗ)的超短波远距离传播	139
§ 11.1. 关于人造地球卫星绕地球旋转的基本知识	139
§ 11.2. 应用人造地球卫星实现超短波远距离通信的一般原则	142
§ 11.3. 决定从地面给定点看到人造地球卫星的时间	144
§ 11.4. 决定从线路两终端点同时看到人造地球卫星的时间	148
§ 11.5. 应用人造地球卫星作为有源转接站的超短波通信线路的能量 计算	149

§ 11.6. 应用人造地球卫星作为无源轉播站的超短波通信綫路的能量 計算	151
§ 11.7. 应用无源人造地球卫星体系实现全球范围内无綫电通信的 途径	153
§ 11.8. 依靠人造地球卫星作为反射体的通信的某些特点	155
第十二章 宇宙无綫电通信問題	160
§ 12.1. 概述	160
§ 12.2. 接收設備輸入端的噪声电平的计算	161
§ 12.3. 地面电台和宇宙飞船通信时最佳頻率的选择	171
§ 12.4. 宇宙飞船間通信頻率的选择	175
§ 12.5. 宇宙通信綫路的能量計算	176
§ 12.6. 发现宇宙中有理智生物发送的无綫电信号問題	177
俄、中文单詞与詞組对照表	
参考文献	

第一章 引言

§ 1.1 基本概念

从 30 兆赫（相当于波长 10 米）到 30000 兆赫（波长 1 厘米）的无线电波叫做超短波（УКВ）。波长短于 1 厘米的波段已经属于毫米波波段。超短波波段一般又分为下列分波段：米波段（波长 10—1 米）、分米波波段（波长 1 米—10 厘米）和厘米波波段（波长 10 厘米—1 厘米）。

下面的叙述，说明了无线电专家们近年来对超短波发生兴趣的原因。

如果在无线电发展的初期，人们建造具有复杂天线设备的大功率（在当时来说）无线电台，只是为了使这电台能同时发送一分电报或一路电话，那末现在，这样小的发送信息量，已经不能够满足对无线电通信的日益增长的需要了。现在的任务是要在通信干线上同时传送 1200 路电话或一个电视节目。在每一个电话电路内同时能传送 18 路电报信息。两个电话电路合并后可以传送无线电广播节目。每一电话电路的频带为 4000 赫，传送 960 路电话，所需要的总频带（包括各个超群间的保护间隔）是 4038 兆赫。传送电视占用频带 5.3 兆赫（没有伴音）^[1]。这样，传送多路电话或电视需要 5 兆赫左右的频带。为了不失真地重现这种传送的消息，载频应该是最大调制频率的 10 倍左右，这在所述情况下约等于 50 兆赫。这表明只有超短波才适于用以传送宽频带的信息。

另一方面，不久以前还认为超短波（粗略地讲）只能在视线距离内传播，而不能用作远距离通信。因为，第一，除了太

阳活动性最强的年代和电离层中产生某种非经常结构之外，电离层各正常分层的电子密度对反射短于 10 米的电波来说是不够的。第二，在超短波段绕射表现得很微弱，因此这一波段的波几乎不能绕过地球凸起的表面。

无线电中继通信线路的广泛应用，可以说是解决超短波有传送宽频带消息的能力而传播距离有限的实际矛盾的方法。把通信线路分成几个段，使各段内相邻电台的天线位于视线距离内，就能利用超短波作远距离信息传送。显然，以每隔约 50 公里装置一个中间无线电中继站的代价来达到这个目的，通信线路的设备是十分昂贵而复杂的。

因此，人们很自然地对超短波远距离直接传送信息的可能性感到兴趣。这方面的可能性只是在近几年才被发现。

目前已知的超短波远距离传播形式有两类。

第一类包括：

- I、超短波在对流层和电离层中不均匀体上的散射传播。
- II、超短波在流星的电离遗迹上的反射传播。
- III、超短波在人造电离云上的散射传播。
- IV、利用装在飞机或直升飞机上的有源转播器的超短波远距离传播。

第二类中包括：

- I、超短波在月球表面上的反射传播。
- II、超短波在太阳大气层中的反射传播。
- III、超短波在人造地球卫星（简称为ИСЗ）上的反射传播。
- IV、利用人造地球卫星作为有源转播站的超短波远距离传播。

§ 1.2 超短波无线电信线路的计算原理

利用传播损耗的概念来评价超短波通信线路的工作是很方便的。

传播损耗是发射机发射功率 P_1 与接收天线送到负载上的功率 P_2 之比。

假如无线电波在自由空间内传播, 发射天线具有增益系数 D_1 , 接收天线具有增益系数 D_2 , 两天线间的距离等于 r , 工作波长为 λ , 那末, 接收天线所在点的波印庭 (Пойнтинг) 向量 (1 秒钟内通过垂直于传播方向的 1 平方米面积的能量流) 的数值由下式决定

$$S_2 = \frac{P_1 D_1}{4 \pi r^2}, \frac{\text{瓦}}{\text{米}^2}. \quad (1.1)$$

这里和以后, 只采用实用单位 MKCA (米·公斤·秒·安)。我们约定, 假使公式中的量是用基本单位表示¹⁾, 那末象在公式 (1.1) 中那样, 单位的符号就不表示出来; 假使是用派生单位表示²⁾, 单位的符号就用注脚标出来。

在天线技术中, 采用接收天线的有效面积的概念 (该面积和波印庭向量的乘积等于接收天线馈送给匹配负载的功率)。假定电波从天线方向性图的最大方向传来, 那末可以指出^[2], 接收天线的有效面积 A_2 和它的增益系数 D_2 有下列关系:

$$D_2 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A_2. \quad (1.2)$$

对具有抛物面、透镜、喇叭等形状的超短波天线, 接收天线

¹⁾ MKCA 制中的基本单位是: 米, 公斤, 秒, 安, 伏, 瓦, 法, 亨, 库, 欧, 赫。

²⁾ 派生单位是: 公里, 毫秒, 微秒, 毫安, 毫瓦, 千赫, 兆赫等等。

的有效面积約等于其几何面积的 60—70%。

饋送到負載的功率由下式決定：

$$P_2 = S_2 \cdot A_2, \text{瓦}. \quad (1.3)$$

將 (1.1) 和 (1.2) 式中的 S_2 和 A_2 代入 (1.3)，求得傳播損耗

$$L_{cs} = \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{1}{D_1 \cdot D_2}. \quad (1.4)$$

有时为了方便引入所謂“傳播基本損耗”的概念。这个損耗就是应用假想的、各向同性的（即无方向性的）輻射器作为收发天綫时的傳播損耗。將 $D_1 = D_2 = 1$ 代入公式 (1.4)，得

$$L_{ocs} = \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2. \quad (1.5)$$

在距离远的通信綫路上，傳播損耗的絕對值很大，因而用分貝表示比較方便。这样，公式 (1.4) 和 (1.5) 將变为

$$L_{cs, \text{dB}} = 10 \lg L_{cs} = 20 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) - D_{1\text{dB}} - D_{2\text{dB}}, \quad (1.6)$$

$$L_{ocs, \text{dB}} = 10 \lg L_{ocs} = 20 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right). \quad (1.7)$$

图1.1給出了按公式 (1.7) 繪制的曲綫。当波长和通信綫路的距离 r 已知时，可以很容易地从图上决定基本損耗的数量。

在实际情况下，无綫电波不是在自由空間內、而是在有能量損耗的条件下傳播的。这种損耗使接收点的場强比在自由空間傳播时弱。能量的損耗可能是由于无綫电波繞过地球表面时的繞射衰减、对流层和电离层散射时的能量損耗和穿过地球大气层时的損耗等等所引起。

如用 F 表示功率衰减（即衰减因子），那末可以把公式 (1.1) 改写成下面的形式：

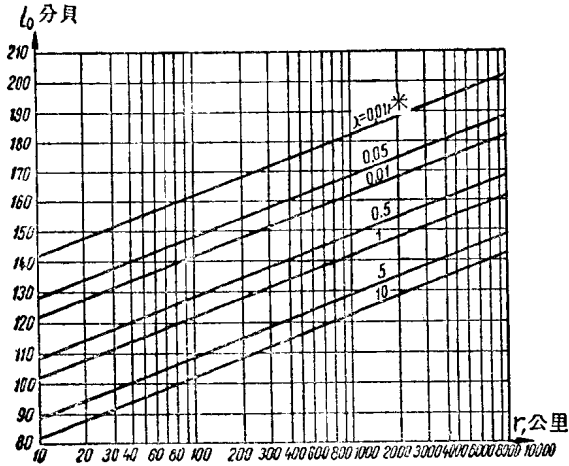


图 1.1

$$S_2 = \frac{P_1 D_1 F}{4 \pi r^2}, \quad \frac{\bar{V}}{\text{米}^2}.$$

衰减因子也可用分贝表示。

当考虑了衰减后，公式(1.4)—(1.7)取下列形式：

$$L = \left(\frac{4 \pi r}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{1}{D_1 D_2 F}, \quad (1.8)$$

$$L_0 = \left(\frac{4 \pi r}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{1}{F}, \quad (1.9)$$

$$L_{\partial\delta} = 20 \lg \left(\frac{4 \pi r}{\lambda} \right) - D_{1\partial\delta} - D_{2\partial\delta} - F_{\partial\delta}, \quad (1.10)$$

$$L_{0,\partial\delta} = L_{oc\partial,\partial\delta} - F_{\partial\delta} = 20 \lg \left(\frac{4 \pi r}{\lambda} \right) - F_{\partial\delta}. \quad (1.11)$$

应用传播损耗的概念来计算通信线路很方便。计算一般是这样进行的：知道了发送信号的频带和所需的信号噪声比（简

写为 c/w), 即可计算可靠地接收信号所必需的功率 P_2 , 然后按照公式 (1.9) 算出传播基本损耗。仿照公式 (1.4), 可以写出

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{L_0}{D_1 D_2}, \quad (1.12)$$

由此得出

$$P_1 D_1 D_2 = P_2 L_0, \text{ 瓦}. \quad (1.12 a)$$

因为公式 (1.12 a) 的右边是已知的, 所以通信线路的计算任务只在于适当地选择发射机的功率 P_1 和具有增益系数 D_1 与 D_2 的天线, 以便使等式 (1.12 a) 成立。这时选择 $P_1 D_1 D_2$ 乘积中的因子 P_1 、 D_1 和 D_2 , 应使设备中发射机和天线的建筑费用最小。

往往将公式 (1.12 a) 写成其中各数量系用分贝表示的形式。

求等式 (1.12 a) 两边的对数, 并乘以 10 后, 得到

$$P_{1\text{dB}} + D_{1\text{dB}} + D_{2\text{dB}} = P_{2\text{dB}} + L_{0\text{dB}}. \quad (1.13)$$

此时通信线路的计算方法和上述基本相同, 差别只在于适当地选择发射机的功率和天线的增益系数, 以便使用分贝表示的这些数量之和等于给定的数值。

现在我们来较详细地研究接收设备输入端必需功率的计算方法。

在超短波波段内, 干扰电平一般是由接收设备输入端的固有噪声所决定。在接收设备教程中^[3]指出, 噪声功率可由下式决定:

$$P_u = N k T \Delta f, \text{ 瓦}, \quad (1.14)$$

式中 N 为与接收机型式及其输入电路结构有关的接收设备的噪声系数,