

国 际 电 信 联 盟

ITU-R
国际电联无线电通信部门

ITU-R P.1321-5 建议书
(07/2015)

**影响在中低频频带内使用数字
调制技术的系统的传播因素**

P 系列
无线电波传播



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
2016年，日内瓦

© 国际电联 2016

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 P.1321-5 建议书

影响在中低频频带内使用数字调制技术的
系统的传播因素

(ITU-R 第225/3号研究课题)

(1997-2005-2007-2009-2013-2015年)

范围

本建议书提供有关中低频地波和天波传播特性的信息，这些特性可能影响到低中频频带内数字调制方法的使用。

关键字

中频 (MF) 传播；季节变化

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 用于中低频频带声音广播的数字调制方式目前正处在研究之中；
- b) 在设计调制方式时需要这些频带的电波传播参数信息，

建议

在设计中低频广播的数字调制方式时，应考虑附件1所提供的信息。

附件1**1 引言**

在中低频频带内大多数的广播业务开展都是依赖于地波传播模型特性的（见ITU-R P.368建议书）。在白天和没有干扰的情况下，业务覆盖范围，主要取决于无线电噪声的强度，即闪电噪声和人为噪声（见ITU-R P.372建议书）和取决于系统正常工作需要的信噪比。在夜间，电波的天波传播成为非常重要的方式（见ITU-R P.1147建议书）。对于模拟幅度调制来说，这些传播方式将限制业务覆盖的范围，因为由地波传播与经常变化和相位时延的天波传播所组合成的传播信号一干扰模式导致信号质量下降。由其他远距离发射源产生的天波信号同样会显著增加夜间干扰，这也会使系统覆盖半径减小，尤其是地波传播提供足够强信号的地方；在本附件内，我们不考虑来自于其他干扰源的影响。

数字调制方式还受到信号模式时延的影响，但适当的数字调制方式设计可以减弱或者抵消这种影响。本附件给出了几种简单的多径传播环境，希望适用于数字调制方式的设计。在调制方法选定之后，需要详细的预测分析方法以用于业务规划。

2 传播模型

2.1 地波传播模型

地波传播的信号通常并不是一成不变的（详见第4节）。按照ITU-R P.368建议书所示，信号的幅度取决于传输的距离和地表电特性参数。此外，信号幅度不会在小的位置变化情况下（几百米）一成不变。

2.2 天波传播模型

在白天时间内，电离层的D区较低部分的信号衰落有效地阻止了天波传播。所以本附件只考虑夜间天波传播比较显著的情况。

日落后，大气电离层E层就会变薄消失，但是对于可以传输的临界频率 f_oE ，就会在中频广播频带内，至少在前半夜是这样的。使用临界频率以下频率的信号，仍然可以通过电离层的E层来传播，并且可以进行多次反射。更高频率的信号，尤其是在远距离传输时，也可以通过电离层E层进行反射传播，但同时该信号也可以穿透E层在更高的F层进行反射传输，用一个简单的模型来表示E反射层，如图1，给出了中频频带的三个频率的可用信号模型与传输距离、日落后时间之间的关系曲线。可以看出，这些模式相比地波传播而言时间上的有时延。

ITU-R P.1147建议书，提供了天波传播模型下的合成信号功率的预测方法，这里不再给出单个模式下相对幅度的必要信息。然而，ITU-R P.684建议书提供了这些参数信息，当然主要基于对500 kHz以下频带的信息。特别是，该信息给出了太阳黑子最小条件下，基于相关建议书中所描述的试验和某些假设而得到的电离层反射系数值。

3 多径时间时延

使用上述简单的传播模型，图2给出了使用700 kHz和1 MHz两种频率时，在传播距离为100、200和500 km三种情况下，信号场强的中值和相应的时间时延。信号场强对于全向辐射功率 $e.m.r.p$ 为1 kW，以及不考虑发射天线的垂直辐射模式的影响，这种影响将减少在近距离内的天波信号电平。

该模型显示在0 ms时是地波传播，不同的场强值分别代表了5 S/m（海水）， 10^{-2} （优良传导大地），和 10^{-3} （非优良传导大地）三种大地电导率情况下的情况。

天波模式主要由相应的传播模型和相应的电平来表示，该电平为太阳黑子最小时日落后4个小时的场强中值。

图1

可获得的传播模式

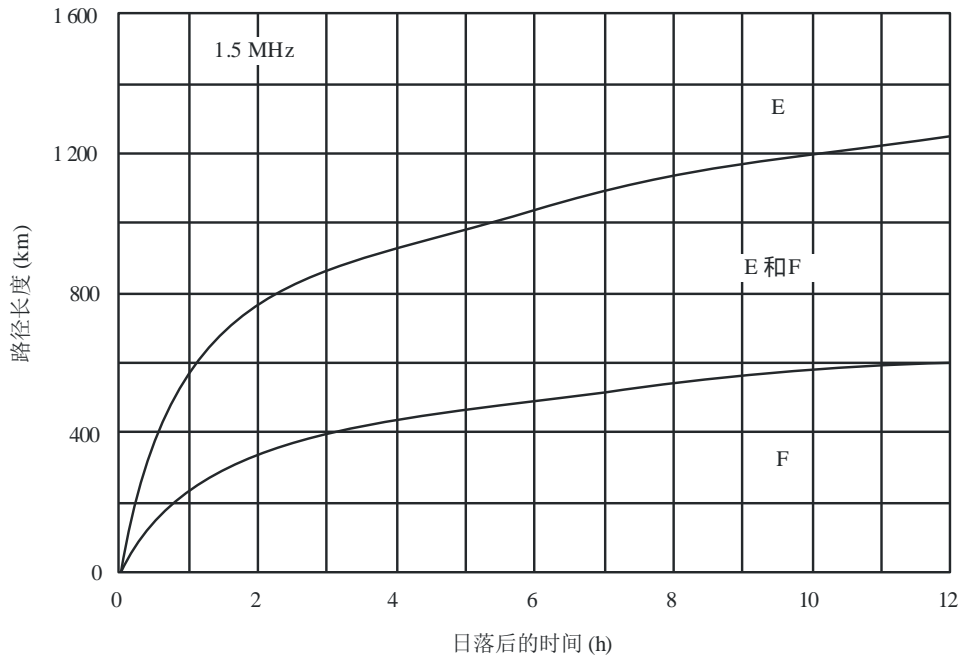
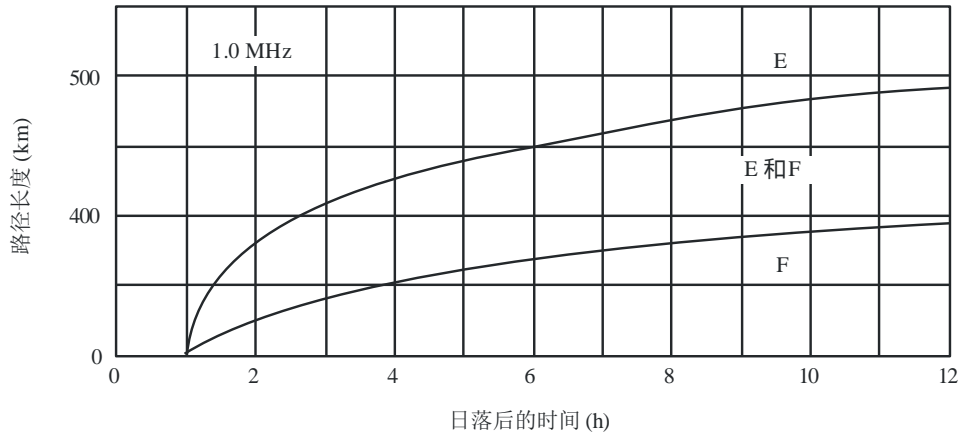
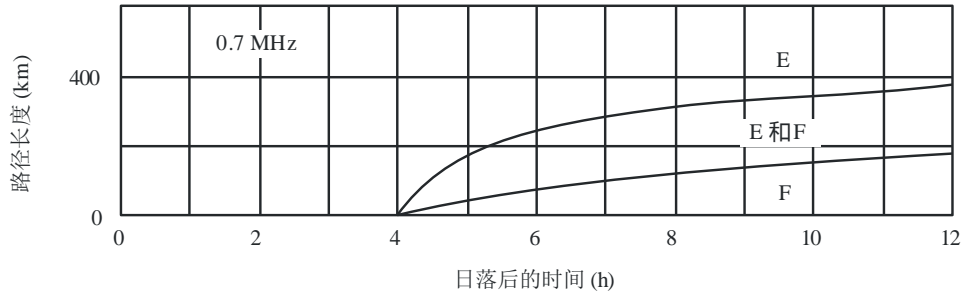
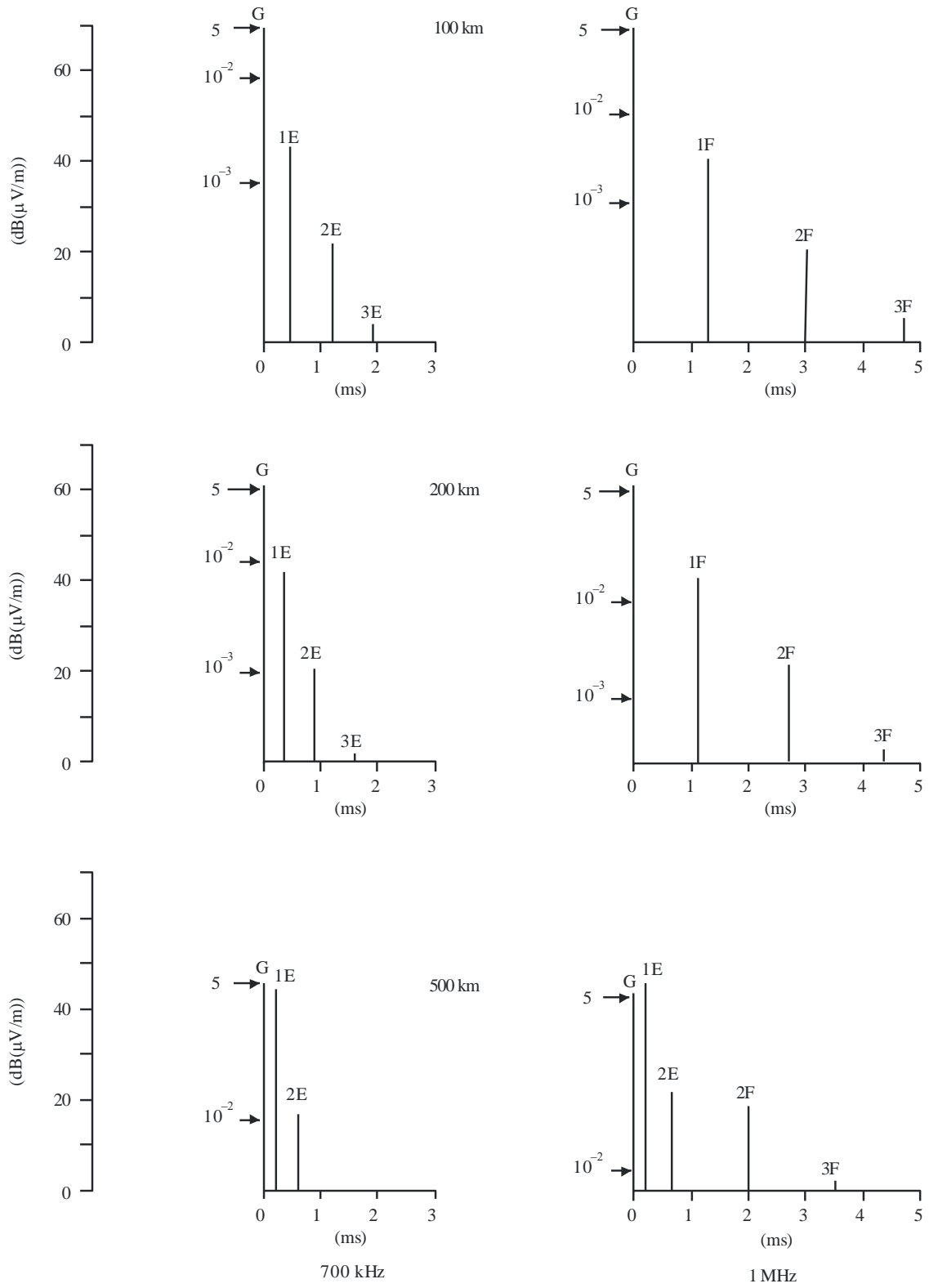


图2

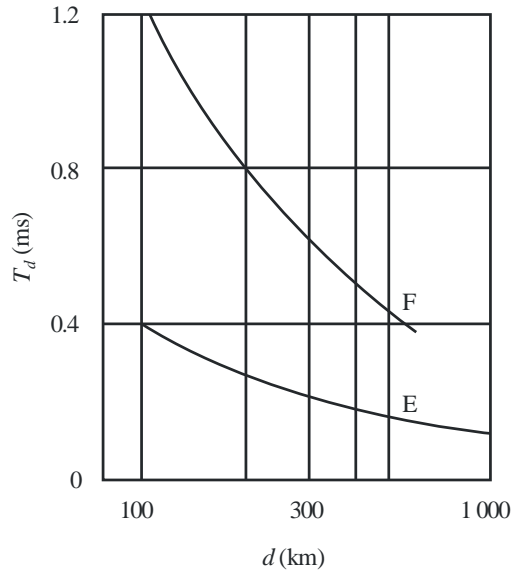
时延扩展的例子



如图3，给出了一跳电离层E层和F层的天波模式相对于地波传播在近1 000千米内的传播时延。而图4则给出了单跳和多跳天波模式之间的相对时延。

图3

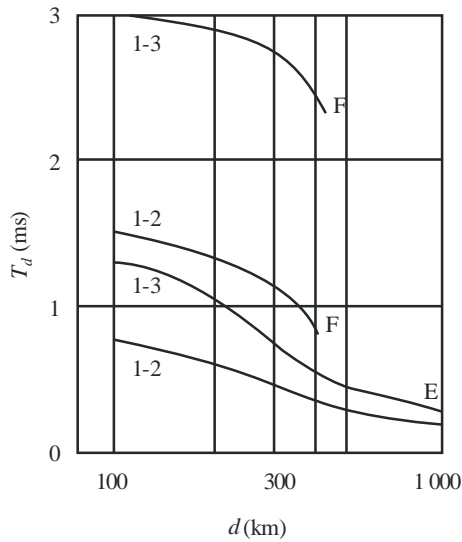
天波信号相对于地波信号的相对时延



P.1321-03

图4

不同跳数的天波信号的共同时延



P.1321-04

地波和天波信号具有相似幅度时的距离范围是很重要的，因为在该区域信号衰落特别严重。这一区域也称为“夜间衰落区域”，而且该区域往往被作为高品质中频广播的范围界限。

4 可变性

4.1 信号随时间发生的变化

4.1.1 季节变化

地波的信号场强会随着季节温度的不同而改变。

对于中等纬度、大陆气候且林区密度很高的MF而言，在最大100公里左右的范围内，链路地波场强的季节变化范围平均值在10-18 dB。在大型城市内（10 dB）或穿越城市时（最高15 dB），链路的场强变化较小。链路场强变化范围的最大值出现在农村地区（15-18 dB）。气候和自然条件类似的其它区域可能会产生类似的结果。

上段是指1月平均温度为-10°C的东欧区域。在其它地理区域，季节变化的平均范围取决于1月的气温（见图1），因为土壤/植被条件相似的链路，其变化只能通过1月的平均温度来区分。考虑到不同地理区域气候条件的差异，权宜之计是按气温范围的比例对场强的季节变化做出大致评估。例如，在1月平均温度为+4°C的城市铺设的链路，如使用上段和表1中的数据计算，则场强范围约在 $10 \times (4/13) \approx 3$ dB。

表 1

北半球一月平均气温(°C)	4	0	-10	-16
冬季-夏季场强差值范围, u (dB)	4	8	13	15

在低频频带，大陆性气候（欧洲大陆和西伯利亚地区测得）中等纬度的场强变化范围取决于距离和频率（由参数 $q = d \cdot f^{1/2}$ 决定），其中 d 为距离（km）， f 为频率（MHz）。 $q < 500$ 值大约说明地波的变化特性，更大的值 $q > 500$ 则涉及电离层天波。

变化范围的相应公式为：

- 树林比例小的路径：

$$U_{s/w} = 3 + 2 \times 10^{-5} \times q^2 + 0.005q \quad \text{dB}$$

- 树林比例大的路径：

$$U_{L/w} = 6.409 \times \ln(q) - 21.124 \quad \text{dB}$$

这里，指标 s/w 和 L/w 分别指所占比例小的树林（最大约占30%）和所占比例大的树林（50%以上）。

4.1.2 小时中值的逐日变化

就均方根（RMS）值而言，在低频频带，小时中值场强相对于月中值的偏差（ σ_L 为低频频带， σ_M 为中频频带）取决于路径长度，而在中频频带则取决于频率。

在低频频带，在树林比例为中等的中纬度地区，此依赖关系为：

$$\sigma_L = 0.073 d^{0.5} + 0.00122 d \quad \text{dB}$$

在中频频带，对没有季节划分的20km至120km路径而言，RMS偏差与频率的关系为：

$$\sigma_M = 0.0018f + 0.6 \quad \text{dB}$$

在这些等式中， σ_L 、 σ_M 为以dB表示的RMS， d 为以km表示的距离， f 为以kHz表示的频率。

4.2 不同地点随时间发生的信号变化

在中频频带，相隔一公里的地点的信号变化幅度类似于世界不同地方的标准偏差值。概率分布实际上与对数正态规律相吻合，平方根偏差为 $\sigma = 3.7$ dB，如图5所示。

在城市街道和地区，标准偏差亦接近4 dB。在楼群密集，特别是靠近发射机（最多为1公里）的地方，标准偏差上升至7-8 dB。个别情况下楼内的附加吸收可达到20 dB。

4.3 信号在夜间的变化

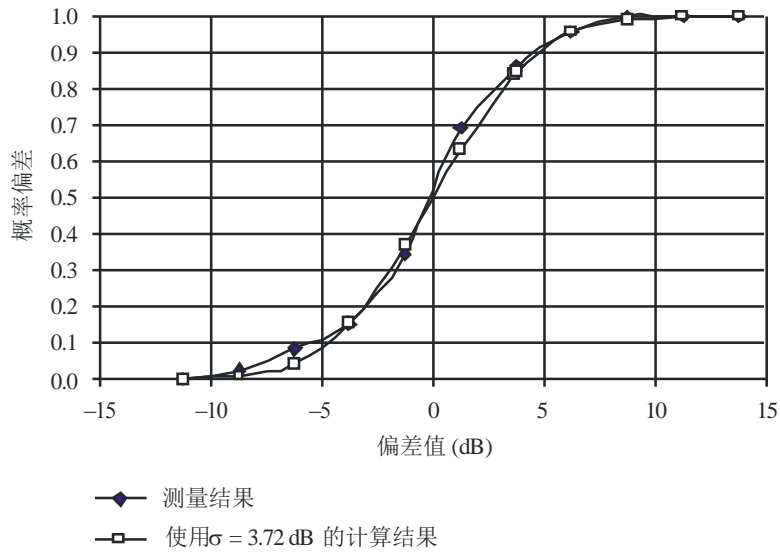
天波模式随着长期不同夜间长度而变化，并且每小时中值服从对数正态分布，其半十分位数值范围在3.5到9 dB之间。不同传播模型在各小时的衰落量也服从对数正态分布；因没有更多的实测数据，但可以估计的是其典型值的标准方差应该在3 dB之内。衰减率在每小时10到30 dB。

在需要考虑天波和地波传播模式信号幅度合成的情况下，例如，在传播模式不能在接收系统分开时，信号的衰落分布将在附录1中讨论。

天波传播模式由于电离层相对运动而引起的多普勒频移效应所产生的信号频率偏移将会是很小的。

图 5

偏差分布规律



P.1321-05

4.4 LF和MF电离层信道的过载和衰减特性

对于中低频频带的数字调制无线电通信系统的分析和规划而言，似乎对平均值和信号散射特点的说明尚不够充分。需要考虑到更详细的过载和衰减特性，特别需要了解不同信号与干扰电平上的过载和衰减持续时间的概率分布。过载和衰减的统计特性是在两年期间从两个链路，一个低频链路（155 kHz的1 550公里）和一个中频链路（539 kHz的860公里）获得的，详见以下的附录2。其结果涉及东半球的中地理纬度和温和的太阳黑子活动（SSN \approx 40）。

在附录2中，表3和表4列出了每个链路每小时过载和衰减。图6和图7则显示了各链路中门限过载持续时间数量（%）的散射图。

5 结论

ITU-R P. 1407建议书定义了一系列的参数用以描述多径效应。“时延窗”是指包括多于98%系统总能量的区域，可以从图2中小于3 ms区域得出。应该注意的是，在某些环境下，最初的多径分量并不伴随最大的幅度特性。

附件1

附录1

下面给出了合成信号的幅度， e ，该信号由一个稳定的地波信号和一个对数正态分布的天波信号的功率和所合成的，如下：

$$e = \sqrt{e_e^2 + e_i^2}$$

其中 e_e 和 e_i 分别表示地波信号和天波信号分量的电平值，通常用 $\mu\text{V/m}$ 表示。

天波信号分量 e_i 服从对数正态分布（见ITU-R P.1057建议书中公式（6））。为方便起见，可以表面上假设地波信号也服从对数正态分布，从而可以通过设置标准差为0 dB得到最后的结果。

两个对数正态分布合成的信号同时也服从对数正态分布，该正态分布的均值是这两个信号均值之和（幅值而非分贝值），同时方差是两个正态分布方差之和。

对于对数正态分布（见ITU-R P.1057建议书），其信号电平的均值和标准差可以由下式得出：

$$\text{均值} = e^m \cdot e^{\sigma^2/2}$$

$$\text{标准差} = \sqrt{e^{2m} \cdot e^{\sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)}$$

其中 m 表示正态分布的均值， σ 表示标准差。

通过以上假设分析，不难得到组合之后的分布的各信号参数值。表2给出了对数正态分布天波信号分量的标准差为3 dB时的举例结果。

表 2

e_i/e_e	相对于地波信号分量均值的均值	标准差
0.5 (-6 dB)	+1.3 dB	0.72 dB
1 (0 dB)	+4.4	1.35
2 (+6 dB)	+5.7	2.0

附件1 附录2

表 3

低频链路每小时过载和衰减的数量

	一天当中的时段 (时)									
	18	19	20	21	22	23	24	01	02	
门限电平	18	19	20	21	22	23	24	01	02	
中间 (过载)	2.3	2.7	3.1	3.7	4.1	4.6	4.4	3.9	3.5	
十分位低端 (过载)	1.5	1.75	2	2.3	2.6	2.6	2.3	2	1.7	
十分位高端 (过载)	1.6	1.8	1.9	2.1	2.25	2.4	2.4	2.3	2.2	

表 4

中频链路每小时过载和衰减的数量

	一天当中的时段 (时)										
	18	19	20	21	22	23	24	01	02	03	
门限电平	18	19	20	21	22	23	24	01	02	03	
中间 (过载)	1.8	2	2.3	2.7	2.9	3.2	3.5	3.5	3	2.7	
十分位低端 (过载)	1.5	1.7	1.9	2.1	2.2	2.4	2.5	2.4	2.3	2.1	
十分位高端 (过载)	1.4	1.5	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.1	2	1.8	

中低频带中等过载持续时间的分布

为大致了解低频和中频频带的中值过载持续时间的统计特性，可采用以下分布：

$$P_k = 0.38 \cdot e^{-d t^2 / r^2} + 0.62 \cdot e^{-0.5 t^2 / q^2} + 0.62 \cdot e^{-b t / r} \cdot \left(1 - e^{-0.5 t^2 / q^2}\right) \quad (1)$$

其中 t (min) 大于或等于 0，而 d 、 b 、 q 和 r 是选择的参数。

中低频带十分位高低两端衰减持续时间的分布

伽玛分布能够很好地说明十分位高低两端衰减持续时间的概率分布：

$$p_G = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda t}, \quad P_G = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot \int t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda t} dt \quad (2)$$

其中：

p_G : 是概率分布

P_G : 是累计分布

t : 持续时间 (分钟)

λ 和 α : 选择的参数。

以下表 5 对多个门限电平的分布和参数值作了说明。

表 5
多门限制的分布和参数

频带	门限电平	过载或衰减	分布	参数
LF	中值	过载	等式(1)	$b = 0.32, d = 3.0, q = 4.0, r = 3.8$
LF	十分位低端	衰减	等式(2)	$\alpha = 2.00, \lambda = 0.67$
LF	十分位高端	过载	等式(2)	$\alpha = 2.20, \lambda = 0.67$
MF	中值	过载	等式(1)	$b = 0.3, d = 0.8, q = 1.8, r = 2.2$
MF	十分位低端	衰减	等式(2)	$\alpha = 3.30, \lambda = 1.13$
MF	十分位高端	过载	等式(2)	$\alpha = 2.95, \lambda = 0.7$

中低频过载持续时间中间值的试验数据差异很小，约一分钟（低频为5分钟，中频为4分钟）。

图 6

低频链路中等门限值每小时过载持续时间
数量 (%) 和累积分布

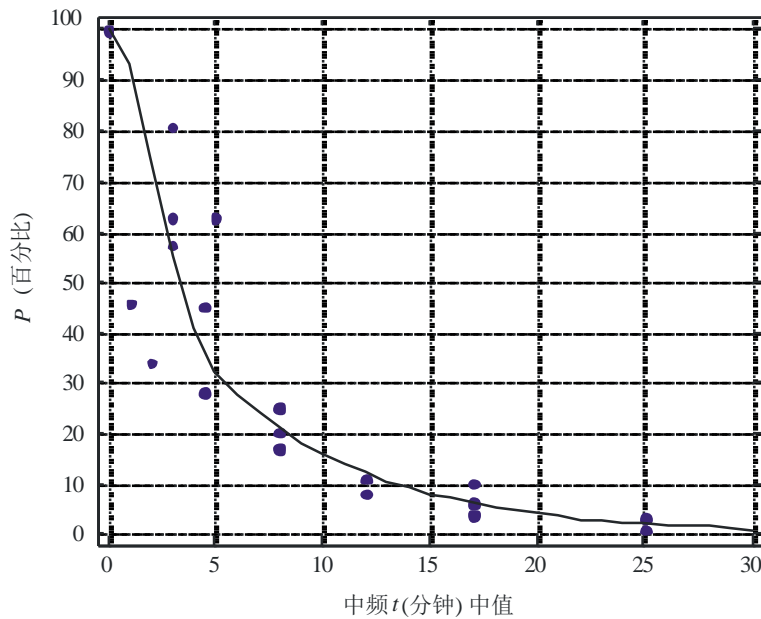
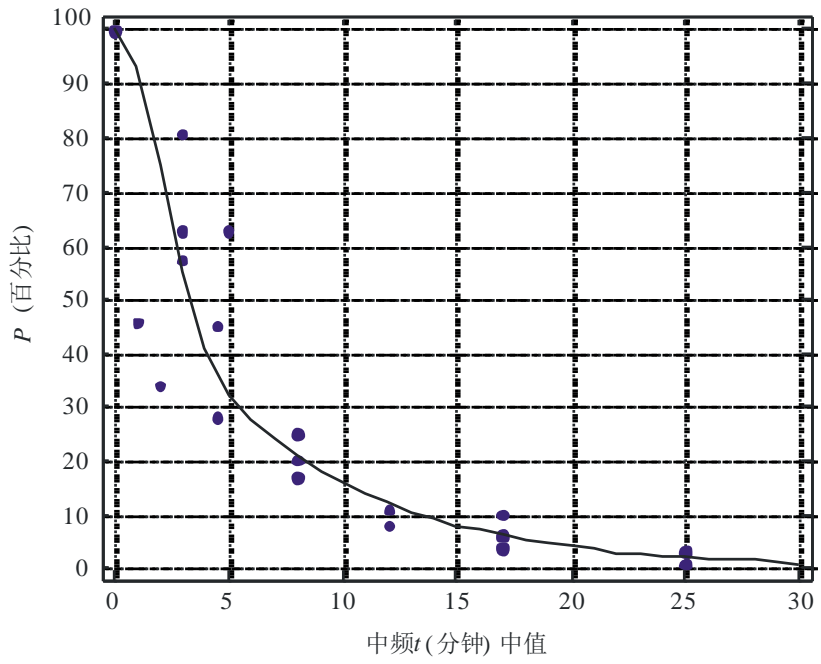


图 7

中频链路中等门限值每小时过载持续时间 (%) 和累积分布



P1321-07