

微波接力通信 技术资料汇编

(一)

邮电部电信总局無線电处 編

人民邮电出版社

內 容 提 要

這本書里一共包括五個資料 其中“30兆週以上的電波傳播”及“特高頻傳輸”兩個資料是專門研究微波傳播的，專題報告中共有四個內容，前三個是民主德國專家梅格拉的報告，後一個是匈牙利專家賽格來母的報告，這兩個報告中既談到微波傳播也談到微波制式。最後兩個資料是特高頻資料，其中之一是 TPC 式機器的說明書，另一個是特高頻用德律風根天線的設計，這些都是很有用的資料。

這本書是這個資料集的第一集，以後第二第三等集將繼續出版。我社已出版的書籍中與這一集有關的書有：公寸波技術，超高頻通信技術，無線微波中繼線路的場強計算方法和路由選擇，無線電中繼線路。

微波接力通信技術資料彙編(一)

編者：郵電部電信總局無線電處

出版者：人民郵電出版社

北京方四六號 13 樓

(北京市資料出版社營業部可代出字號〇四(一)號)

印刷者：北京市印刷一廠

· 內 部 資 料 ·

開本 850×1168 1/32

印張 7 插頁數 114 總頁數 2

印刷字數 197 000 字

印數 1—3,000 冊

1958 年 12 月北京第一版

1958 年 12 月北京第一次印刷

書號 8984-壹197

定額 (10) 1.10 元

目 录

1. 30兆週以上的电波傳播	1
(1) 引言	1
(2) 自由空間的电場	2
(3) 發射电力与收信电力的关系	5
(4) 平面地形上空电波傳播	6
(5) 电波沿地球弧面的繞射	12
(6) 大气的折射及吸收	17
(7) 經過刃形障碍物的电波傳播	20
(8) 与电波傳播有关的其他因素	25
(9) 輸入电力的最低限度	26
(10) 总结及举例	28
★ 附录	31
★ 註解	36
2. 特高频傳輸	39
3. 專題报告	62
(1) 定向無綫通信技术	62
(2) 电视	76
(3) 無綫电通信	83
(4) 微波無綫电接力电路的建立	135
(5) 24路脉冲位置調制机器	160
4. TRC 特高频收發信机說明書	164
5. 超短波德律風根天綫的計算	211

30兆週以上的電波傳播

摘要——電磁波的傳播與其週率，距離，天綫高度，地面曲度，大氣情况等，皆有密切關係。本文內容系專門研討30兆週以上的電波傳播，及其與上述諸因素的關係。文內將大量的記錄數字歸納成一聯串的“列綫圖”(Nomograms.)。在通常的應用里，讀者只需借助其中的三，四圖表，即可在一分鐘內估計出兩已知地點間的收信電力及收信場強度。

如將所研究的週率範圍限制在30兆週以上，則因地面對於電波的影響降為次要因素，故電波沿平滑球面傳播的原理可加以簡化。文內並將由“經驗計劃”所估計出的數字——如山嶺、建築物及大氣折射等影響與實地所測得的數字——如陰影損失及衰落距離等，互相比較，引証，以便求得更確實可靠的結果。

1. 引言

關於研究電波沿平滑球面傳播的原理及其與距離，週率，天綫高度及地面情況影響的計算，已有兩種方法即 Burrows 及 Gray 法與 Norton 法(見註 1 及 2)。二者計算的過程雖然不同，但其結果在基本上是相同的。用它們來計算通常使用“地面天綫”的較低週率時，是比較簡捷的，如果週率增高，計算就會漸趨複雜而吃力，但當週率增至 30 或 40 兆週以上，通常使用“架空天綫”時，兩支水平天綫間的“電路損失”與兩支垂直天綫間的“電路損失”，即逐漸相等。並且這兩種天綫的電波傳播亦皆逐漸與地面電氣常數無關，因此它們的計算方法大有簡化的可能。利用本文所附的圖表，曾經實際解決很多特高頻或更高週率的電波傳播問題。圖表中係利用輸至一配諧收信機的“收信電力”或“收信場強”來表示無線傳輸的實質，“收信場強”的觀念雖較普遍、熟悉，但當週率增高時，應用“收信電力”的觀念則更為方便。

當引述“平滑地面原理”時，並參入一種“近似值法”，用以估計

山嶺及其他建築物等在波路中的影响。因为本文的目的是要在一般的，平均的气候情况下，利用簡單的圖表，能迅速地預測電波傳播的結果，所以文中討論“大气折射”，“对流層傳播”或“大气导道”^{*}及“大气之吸收”时，皆較為簡略。

本文希望讀者只用圖表，不經計算，即可直接求出一般的答案，只有当需要从某三四个表中轉求 db 值时，才使用算术。本文中亦將基本的算式列出，用以幫助讀者了解圖表所代表之原理及意义，如果需要时，亦可使用算式來求出更精確的答案。

本文并未考虑天波傳播，虽然电离層对于30兆週以上的電波亦有反射作用，并偶然造成長距离的傳播，而使远距离外之同週率电台受到干扰(見註3)。

研究電波傳播原理的最适当步驟，就是首先假定兩天綫間是“自由空間”的電波傳播——用“收信場强”及“收信電力”來表示。但是大部分的通信都不是在“自由空間”的，所以第二步就是討論“完善地平面”的影响，然后再討論地面曲度的影响，当基本的“平滑地面原理”完成后，再討論大气情况及地面不平整对于“收信電力”的影响。

* 大气导道 Atmospheric ducts——在对流層中，如以“經過修正的折射指数”为高度的函数，划一曲綫圖，可以看見在某一高度的折射指数最小，在此高度的下面可以發現同一最小值，这两个最小值之間的大气層，即称为“大气导道”。如果往下找不到另一相同的最小值，則以地面高度代替第二最小值之高度。——譯者註——

2. 自由空間的電場

電波在“自由空間”里傳播的路程是直綫式的，所經過的空間是“真空”的，或充滿“理想大气”的，并須与任何外物有足够的距离，以免發生吸收或反射的現象。在自由空間里，距發射天綫 d 公尺远的電場强度 E 为

$$E_0 = \frac{\sqrt{30g_1P_1}}{d} \text{ 伏/公尺} \quad (1)$$

式中的 P_1 为發射电力的瓦数

g_1 为發射天綫的电力增益

脚註 1 表示属于發射方面的

脚註 2 表示属于收信方面的

“理想天綫”向各方發射的电力皆相同，故其增益 $g=1$

在自由空間內(或起碼距地面 $1/4$ 波長)使用“平衡式天綫”时，其 g 值等于此天綫与“理想天綫”之电力增益的比数。

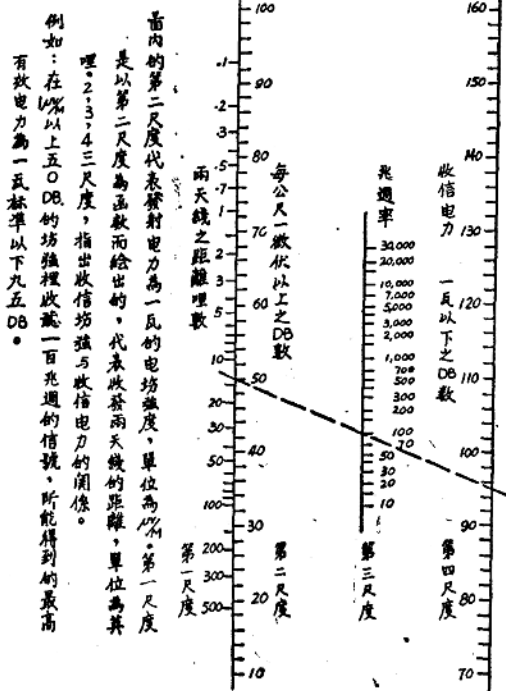
使用小型的“双極天綫”，而天綫的全部“物理長度”远較 $1/2\lambda$ 为短时，其方向增益 $g=1.5(1.76\text{db.})$ ；如其長度等于 $1/2\lambda$ 时，則其輻射力最强方向的增益 $g=1.64(2.15\text{db.})$ ，而其余方向的輻射力当然会减低，其减低的数量可由实际测量或由理論求得之“自由空間天綫輻射分佈圖”中查出。因此，在“自由空間”里，垂直于半波双極式天綫的“电場强度”为

$$E_0 = \frac{\sqrt{30 \times 1.64P_1}}{d} \sim 7 \frac{\sqrt{P_1}}{d} \quad (2)$$

圖 1 內的第二尺度代表以發射电力为 1 瓦的“电場强度”，單位为 uv/M ，第一尺度是以第二尺度为函数而繪出的，代表收發兩天綫的距离，單位为英哩。如果發射电力为 P 瓦时，則必需以 $10\log P$ db. 来修正第二尺度，例如，在“自由空間”里，一个半波双極式發射天綫的發射电力为 1 瓦，則距此 100 哩的收信“电場强度”应为 1uv/M 以上 33db. (約 45uv/M)；当發射电力增至 50 瓦(1 瓦以上 17db)，則收信“电場强度”应为 1uv/M 以上“ $33+17=50\text{db.}$ ”(約 315uv/M)。上述的“电場强度”代表收信天綫附近的“电能密度”，而与收信天綫的形式無关。

以 N 个双極天綫(包括推动單元及寄生單元)所組成的天綫排，其理想的方向增益应为單式双極天綫的 N 倍，但需將天綫的各项損失計入。

圖1 自由空間之場強及收信電力(發射電力為一瓦, 使用半波雙極式天線)。



如果天線是喇叭形，拋物面形或透鏡形，則其理論上的增益應為

$$g = 4\pi B / \lambda^2$$

式中 B 代表天線開口面積，單位為平方公尺。但上述諸天線的实际效率并不能如此優良，故应用有效面积代入上式，即將開口面积打一对折或 $\frac{2}{3}$ 折。

3. 發射電力與收信電力的關係

在未開始討論地面如何影響“自由空間”的“場強”以前，最好先研究“收信場強”(不一定等於“自由空間”的“場強”)與收信機實得電力的關係。一架配譜良好的收信機能從天綫得來的最高有效電力 P_2 為

$$P_2 = \left(\frac{E\lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{g_2}{120} \text{瓦} \quad (3)$$

式中 E = 收信場強度，單位為 v/M ，

λ = 波長公尺數 = $300/F$ ，

F = 兆週數，

g_2 = 收信天綫增益，

圖 1 中的 2, 3, 4, 三尺度，指出“收信場強”與“收信電力”的關係，所使用的天綫為半波雙極式。例如：在 $1\text{uv}/M$ 以上 50db 的場強里，用一個半波雙極天綫收聽 $100M.C.$ 的信號，所能得到的最高有效電力為 1 瓦標準以下 95db 。

收信電力 (3 式) 與發射電力 (1 式) 之一般比例關係如下式

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 g_1 g_2 \left(\frac{E}{E_0} \right)^2 \quad (4)$$

如收發兩天綫均為半波雙極式，則電力授受關係的比例如下，

$$\frac{P_2}{P_1} \left(\frac{1.64\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left(\frac{E}{E_0} \right)^2 = \left(\frac{0.13\lambda}{d} \right)^2 \left(\frac{E}{E_0} \right)^2 \quad (4a)$$

圖 1 表示上式在“自由空間”($E/E_0 = 1$) 中的傳輸關係。

如果使用喇叭形，拋物面形或復極天綫時，則用下式表示收信電力與發射電力的關係更為恰當，用 $g = 4\pi B/\lambda^2$ 代入第 4 式，即得下式

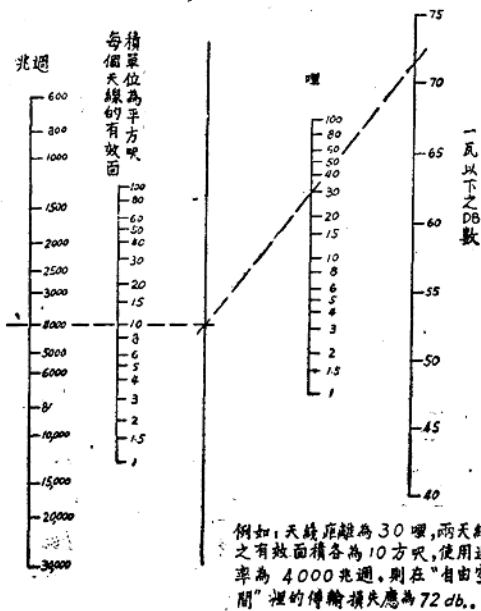
$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{B_1 B_2}{(\lambda d)^2} \left(\frac{E}{E_0} \right)^2 \quad (4b)$$

式中之 B_1 = 發射天綫的有效面積，

B_2 = 收信天綫的有效面積。

圖 2 表示当 $B_1 = B_2$ 时，上式在“自由空間”中的傳輸关系，例如：天綫距离为 30 哩，两天綫之有效面积各为 10 方呎，使用週率为

圖 2 在自由空間，發射電力为一瓦，两个有效面積相同
之天綫間的收信電力



4000兆週，则在“自由空間”里的傳輸損失应为72db。

4. 平面地形上空的电波傳播

地面可影响电波的發射及傳播，所以地面上的收信場强常小于“自由空間”里的場强。地面可视为部分的反射器及部分的吸收器，二者皆可影响电能在地面上空的分配，下式即表示“平面地形”对电

波傳播的主要影响 (見註 4 及 5)

$$E = E_0 [1 + \underbrace{\text{Re}^{j\Delta}}_{\substack{\vdots \\ \text{直接} \\ \text{波}}} + \underbrace{(1 - R) \text{Ae}^{j\Delta}}_{\substack{\vdots \\ \text{地面} \\ \text{波}}} + \dots] \quad (5)$$

∴
∴
∴
∴

直接
反射
地面
感应电場及二

波
波
波
次地面效应

式中 R 代表地面反射系数，当反射波与地面所成的角度 θ 不大时， R 約等于 (-1) 。通常假定地面是完善的导体，即認為它对来自任何角度的“垂直極化波”的反射系数都是 $(+1)$ 。这个假定在此处是会引起誤会的，因为此处应用的重点，是在小的角度。当投射角 θ 漸接近于 0 时，則反射系数亦漸近于 (-1) ，这对于地面导电性为任何“有限值”时皆可适用，即使地面为純銅所制也是正确的。反射系数的大小及其相位关系可用下式求出 (見註 6)

$$R = \frac{\sin\theta - Z}{\sin\theta + Z} \quad (6)$$

式中 $Z = \sqrt{\epsilon_0 - \cos^2\theta} / \dots$ 适用于垂直極化波；

或 $= \sqrt{\epsilon_0 - \cos^2\theta} \dots$ 适用于水平極化波。

$$\epsilon_0 = \epsilon - j60\delta\lambda$$

ϵ = 地面的介电系数 (以自由空間为 1)

δ = 地面的导电系数單位为姆欧/公尺

λ = 波長，單位为公尺

$$j = \sqrt{-1}$$

$$e^{j\Delta} = \cos\Delta + j\sin\Delta$$

地面波的“減衰因數” A ，与週率，地面常数及極化的种类皆有关系。 A 永远不会超过 1，并且当距离及週率增加时， A 就会减小，它的近似值可用下式求出 (見註 7)

$$A \approx \frac{-1}{1 + j \frac{2\pi d}{\lambda} (\sin\theta + Z)^2} \quad (7)$$

5 式中的 Δ 角代表“直接波”与“反射波”因路途远近不同而發生

的相位差，其单位为弧度，当两天线间之距离 d 大于 $5(h_1+h_2)$ 时，则 Δ 角 $= 4\pi h_1 h_2 / \lambda d$ 。式中的 h_1 及 h_2 代表发射天线及收信天线的高度。

由 5 式中可看出，地波传播可分为三大主要部分，即直接波，反射波及地面波，前面两项相当于我们熟悉的光波，但是地面波就比较为特殊。因为地球不是一个完善的反射体，有些电能射入地面，即被吸收，并发生“地面电流”；使靠近地面之“电磁场”的分佈情形受到影响，与假定地面为一完善反射体的“电磁场”完全不同。地面波的极化情形与地面电流有关（见註 8），垂直极化时称为垂直电场；水平极化时称为水平电场。在距地面愈高处，直接波与反射波的总和也愈大，如在陆上通信，需距地面 (1λ) 以上的高空；地面波才能发生实际效应；在海面上则需距水面 $(5-10\lambda)$ 以上，才能发生实际效应，所以在週率较低（仅为几个兆週）时，地面波才能构成地波之主要部分，但在高週（30—300 兆週）时，则降为次要成分，当週率再高（300 兆週以上）时，则常被略去。

5 式是用物理来描述地波的各种成分，但实际上使用下面的“等值式”则更为方便

$$\frac{E}{E_0} = 2\sin\frac{\Delta}{2} + j[(1+R) + (1-R)A]e^{j(\Delta/2)} \quad (8)$$

当 Δ 角 $(4\pi h_1 h_2 / \lambda d)$ 大于 0.5 弧度时，括号内的数值（包括地面波）常被略而不计，故 8 式可简化为 8a 式，仍可得到相当准确的近似值

$$\frac{E}{E_0} = 2\sin\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d} \quad (8a)$$

由上述可以看出，地面对于电波传输的主要效果是发生“干扰环”或“干扰叶”。如距离及週率已固定，当任何一方之天线高度渐增时，地面影响可使“实际场强”沿“自由空间的场强”发生起伏现象。

当 Δ 角小于 0.5 弧度时，则收信天线已低于“第一环叶”的最强

部分，故地面波的影响较为重要。应用下式可得到相当准确的近似值（見註9）。

$$\left| \frac{E}{E'} \right| = \left| \frac{4\pi h_1' h_2'}{\lambda_1} \right| \quad (8b)$$

上式中的 $h' = h + jh_0$ 代表天綫有效高度之最低值 (h = 天綫实际高度, $h_0 = \lambda/2\pi Z$)。圖3即表示 $|h_0|$ 在海面上或“好土壤”及“坏土壤”上的数值, “好土壤”就是粘土, 壤土, 沼澤或溼地; “坏土壤”所指为“多石地”或“沙地”。

“天綫高度”对于地面波的控制力较小, 而“天綫有效高度之最低值”对于地面波的控制力较强。

天綫高度变动时, 对于“收信場强”或“收信电力”并不能發生显著的影响。当天綫高度大于“有效高度之最低值”时, 则每当天綫高度加倍, “收信場强”或“收信电力”約增加6db., 直至达到“自由空間”的传播情形为止。通常計算中, 可假定 h' 等于“天綫实际高度”或“天綫高度之最低值” (应选用二者中的較大数), 所得的结果已足够准确。

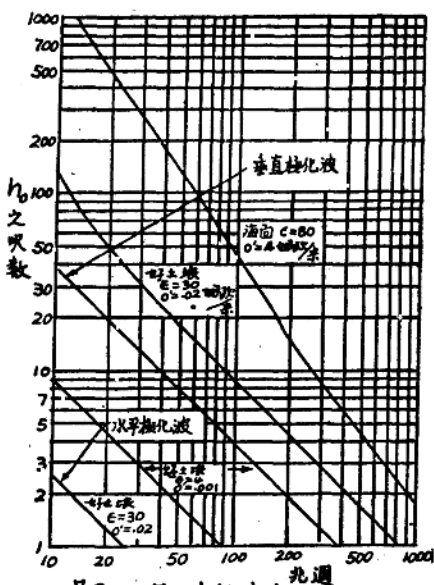


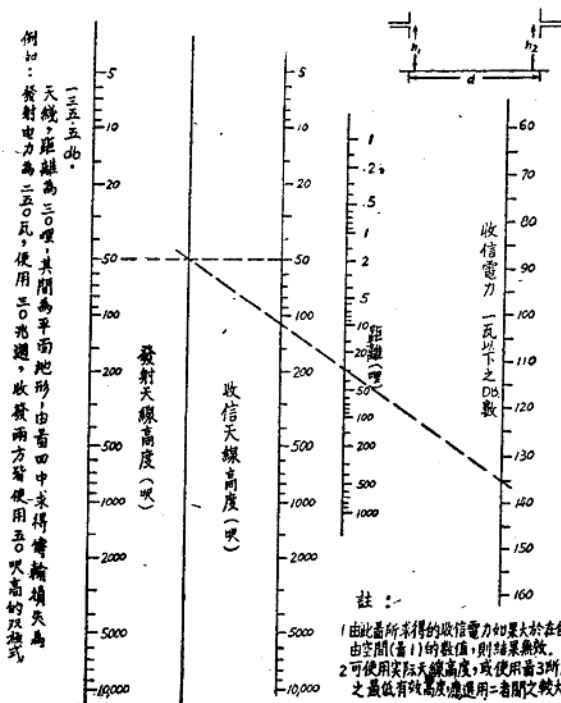
圖3 最小有效高度

在“平面地形”上, “收信电力”与“發射电力”的比值, 用可(8b)

式代入(4)式中而求出，結果如下。

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 g_1 g_2 \left(\frac{4\pi h_1 h_2'}{\lambda d} \right)^2 = \left(\frac{h_1 h_2'}{d^2} \right)^2 g_1 g_2 \quad (9)$$

圖4 在平面地形上之收信電力
(發射電力為1瓦，收發兩天線皆為半波雙極式)



上式之結果與週率無關。圖4即表示當使用半波雙極天線($g=1.64$)時， P_1 與 P_2 之關係。其用法為：在兩條代表天線高度的列綫間劃一直綫，他穿過中間的“支點列綫”，由此交叉點劃第二直綫，穿過代表距離的列綫而與最右端之列綫相交，在此最右列綫上，即

可查出当“發射电力”为1瓦时之“收信电力”是多大。如果要把結果化成“收信場强”时，可用圖4之結果代入圖1，其手續为：由圖1之第4列綫划一直綫，穿过代表週率之第3列綫而达第2列綫，在第2列綫上即可查出“收信場强”的数值。如果由圖4所求得的“收信电力”不超过圖1所示的“自由空間收信电力”时，則其答案是正确可靠的，否則即表示 Δ 角太大，用(8b)式不能得到准确的結果，其“收信場强”或“收信电力”必沿“自由空間”值作上下之起伏如(8a)式所示。

例如：發射电力为250瓦，週率为30兆週，收發兩方皆使用50呎高的双極式天綫，距离为30哩；其間为平面地形。由圖4中求得傳輸損失为135.5db，因250瓦等于1瓦标准以上24db，故“收信电力”应为1瓦标准以下 $135.5 - 24 = 111.5$ db。（由圖1求得在“自由空間”里的“收信电力”为1瓦标准以下 $91 - 24 = 67$ db，故圖4所得的結果可以采纳）。上述的“收信电力”尚可用圖1化为“收信場强”，即1瓦以下111.5db的“收信电力”在30兆週时，相当于 uv/M 以上23db的“收信場强”。如果上例中的天綫高度，有一方不是50呎，而是在“好土壤”上高10呎，則必須先由圖3中查出天綫的“有效高度之最低值”为30呎，再以30呎代入圖4的“天綫高度”列綫，用来求出“傳輸損失”。上例只代表地形为“完善的平面”，实际上因地球表面是弧形的，故应在結果上增加4db的損失，此事將在下节內討論。

地面除了影响电波的傳播外，尚可影响天綫的阻抗，因而影响电波的授受关系。但在30兆週以上的通信，这种影响是可以略而不計的（鞭式天綫除外）。地面之影响，使“天綫阻抗值”沿“自由空間天綫阻抗值”之曲綫而起伏。如果天綫的中心高度高于 $1/4\lambda$ 时，这种影响也是不甚重要的，为适当的表現平衡式天綫在接近地面时所引起的阻抗变化，姑且將前式中“方向增益” g 值換用 $g' = g/r, r$ 代表“受地面影响后的天綫輸入电阻”与“同一天綫在自由空間的輸入电阻”之比值。上面所述皆假定天綫与發射机間之“电抗”已恰調

至平衡。

使用“水平双極天綫”，且与地面之高度低于 $1/4\lambda$ 时， r 之比数小于(1)；当天綫漸接近完善导体的地面时， r 值亦漸接近于(0)。但实际上，当天綫高度漸至(0)时， r 并未达到(0)值，这是因为地面确有相当电阻，其导电系数并非無限大的緣故。在使用長波时，常將“行波天綫”及“頂負荷天綫”称为“水平天綫”，但在此处，因为是用它們来發射或接收垂直極化的电磁波，所以不能再認它們是“水平天綫”。

使用“垂直半波双極天綫”时，因为天綫中心距地面之高度少有小于 $1/4\lambda$ ，故 r 值約等于(1)。当使用很短的“垂直双極天綫”时，則 r 值大于(1)。当此天綫很接近地面时， r 值会漸近于(2)。这也就是说，如果使用短的“垂直双極天綫”其总長 $2l$ 短于(λ)，在“自由空間”里，它的“輸入發射电阻”等于 $80(\pi l/\lambda)^2$ 欧，但在接近地面时，就会变成 $160(\pi l/\lambda)^2$ 欧。

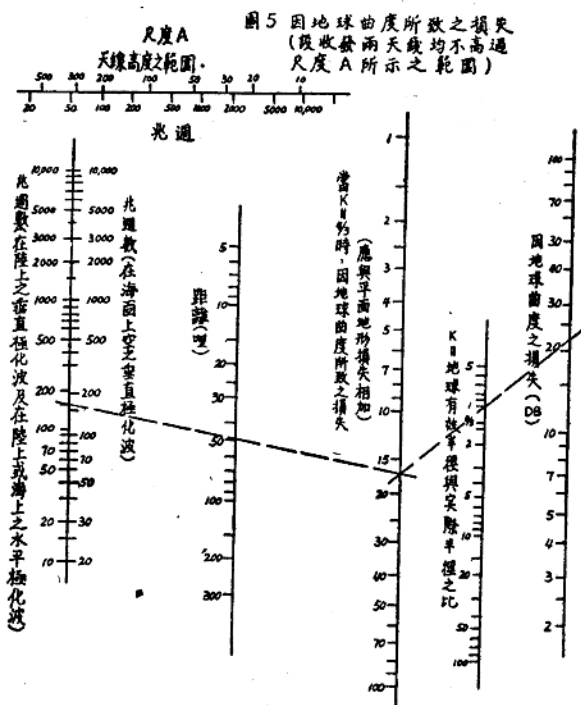
如果使用“鞭形天綫”，并有完善的“地網”时，可設 $r=2$ ，其結果是正确的，这也就是说：使用長度为 l 的“垂直鞭形天綫”，它的效力会比使用長度为 $2l$ ，高度大于 $1/4\lambda$ 的“双極天綫”的效力小 3 db，收發天綫皆如此。但在收方，因为外来杂音是可以控制的，所以收方天綫的效力是不太重視的。

5. 电波沿地球弧面的繞射

無綫电波会沿地球表面而發生弯曲現象。週率漸增，則曲度漸小。“繞射”是波动基本特性之一，也是为求得更精确的“波动光学”而对“几何光学”的修正。換句話說，光綫經過障碍后之陰影邊緣是朦朧的，明暗的变化是漸減的而不是絕對銳利的。我們通常的經驗，認為光綫是只会走直路的，因而它的陰影也是銳利的，这是因为光波的波長極短，它的繞射現象也極為微小，不用特殊的仪器就感覺不出来的緣故。至于無綫电波繞射現象的多少，可以用1000兆週的电波来与1000周的音波(在空气中)相比拟，因为二者的波長是

相等的，故二者遭遇障礙時，將得到同樣方便的繞射。

電波沿地球弧面的繞射，可使通信距離長於視線距離，但相伴



例如：使用 150 光週，收發兩天線的高度均低於 175 呎
兩站距離為 50 哩，則因地面曲度所致之損失為 22 db
應將此數加在“平面地形傳輸損失”之內。

的增加了另外一種損失，這種損失隨着距離及週率而增加，並與天線的高度有相當的關係。損失的數字可以在圖 5 里查出，但必須以收發兩天線的高度均不超過圖頂所示的高度為限。求出的損失數字可以加在由圖 4 所求得的“平面地形傳輸損失”內。例如：使用週率

为 150 兆週，收發兩天綫的高度均低于 175 呎，兩站距离为 50 哩，則因地面曲度所致之損失为 22db。应將此数加在“平面地形傳輸損失”之內。

上述数值系假定为純粹的繞射現象，即使在眞空內亦如此，故其補助变数 $K=1$ 。大气中尚有折射現象，二者的原理虽然互異，但其效果是相同的， K 值即是用来修正折射影响的，此事將在下节

