

1001

超 高 頻 技 術

陆鍾祚 編著

人民邮电出版社

內 容 提 要

這本書很詳細地講述了超高频技术的基础知識。共分七章，如傳輸綫，电磁波，波导管，空腔諧振器，波导管元件，微波測量等。很适合作大学無綫电系的教本，也可作鑽研微波無綫电技术的參考讀物。

0013/06

超 高 頻 技 術

★

編 著 者： 陆 鍾 祚

出 版 者： 人 民 郵 電 出 版 社

北京東四 6 條 13 號

(北京市書刊出版業營業許可証出字第 048 號)

印 刷 者： 北 京 市 印 刷 一 廠

發 行 者： 新 華 書 店

★

開本 850×1168 毫米

印張 11 1/2 頁數 183 插頁 1

印刷字數 308,000 字

印數 1—2,580 冊

1958 年 5 月北京第一版

1958 年 5 月北京第一次印刷

統一書號 15045·基 742—無 183

定 價 (10) 1.90 元

序 言

超高频技术和超高频管是电子器件專業必修的專業課目，而前者又为后者的基础，因为在超高频管許多主要的类型上电子运动的部分和能量得以交换的电路部分往往結合成一个整体而不可分割。因此学习超高频管的人必須先学超高频技术。毫無問題，普通的無綫电技术和电磁場原理也是超高频管的主要基础。

本書的內容原为著者講授超高频管这一課目中的一部分，为满足新学制的情况將技术和管分列成二門課，因而將超高频技术这一部分划出再加补充而編成本書。在取材上仍以服务于超高频管为基础，至于合乎应用的許多电路的問題以及实际的超高频技术設備的問題均未选入，以免內容过于龐大失去为管子作基础的这一要求。为满足应用者的需要，特在卷末附录一定的參考資料名册。

本書內容共分射頻傳輸綫、电磁波原理、波导管傳輸系統、空腔諧振器、微波元件及微波測量技术六部分，連絡論共七章。这些內容都是学习超高频管所必須的基本理論基础，也是从事超高频技术工作所必需的理論基础，由此可以进習器件或是应用。內容足供60学时講授，每章之末并附一定数量的練習題供練習之用。

書中采用有理化的实用單位 (RMKS) 制，这在国际上有通用的趋向，并为国际協議單位制之一，苏联科学院度量單位委員會也采用这單位制。

由于个人学識水平有限，在滿足超高频管的基础要求上，作为專業用的数学書籍和參考書籍講其中安排不当之处必多，希望国内学者不吝賜正。

陸 鍾 祚

南京工学院超高频管教研組，

1957 年。

目 录

第一章 緒論

1•1 总 述	1
1•2 超高频技术的发展过程	2
1•3 超高频技术的应用部門	2
1•4 超高频技术中频率的分段	3

第二章 射頻傳輸綫

2•1 总 述	4
2•2 傳輸綫的基本关系式	5
2•3 傳輸常数及特性阻抗	8
2•4 傳輸綫上的波 速	10
2•5 傳輸綫上的駐 波	12
2•6 駐波比、反射系数及傳輸系 数	15
2•7 傳輸綫上的阻 抗	20
2•8 無損耗傳輸綫	23
2•9 無損耗傳輸綫的等值 电路	24
2•10 無損耗傳輸綫的变量性質及倒轉 性質	27
2•11 射頻傳輸綫傳輸的功率及效 率	28
2•12 諧振傳輸綫的 Q 值	32
2•13 几种常用傳輸綫的参数的計算 公式	35
2•14 傳輸綫的圖 解 法	36
2•15 圖解法的应用 举例	41

第三章 电磁波原理

3•1 总 述	50
3•2 静止电磁場理論概念的总 彙	50
3•3 动电磁場的理論 概 念	52
3•4 麦克斯偉方程及平面电 磁 波	54

3•5 平面电磁波的传播及其性质	64
3•6 电磁波能矢量(烏莫夫—波印亭矢量)	67
3•7 电磁波在边界面上的性质	69
3•8 电磁波的反射	72
3•9 电磁波的极化	75
3•10 介质的导电率及介质常数和衰减系数	76
第四章 波导管	
4•1 总述	80
4•2 矩形波导管	81
4•3 圆柱波导管	124
4•4 波导管的阻抗概念	167
4•5 波导管传输系统上的阻抗中断和插入损失	171
第五章 谐振腔	
5•1 总述	178
5•2 矩形谐振腔	180
5•3 矩形谐振腔的 Q 值	186
5•4 圆柱谐振腔	191
5•5 圆柱谐振腔的 Q 值	195
5•6 同轴圆柱管谐振腔	199
5•7 重入式谐振腔	200
5•8 谐振腔的等值电路	218
5•9 谐振腔在应用下的 Q 值、耦合系数、和外接负荷	221
5•10 谐振腔的耦合	225
第六章 波导管元件及波导管分件	
6•1 总述	229
6•2 终端活塞捷路段	229
6•3 终端开路的波导管	233
6•4 波导管分支接头	234
6•5 分支联接的电抗	236

6•6	波导管軸向上的橫向元件·····	240
6•7	波导管變量段·····	249
6•8	波导管濾波器·····	255
6•9	相位變移器·····	265
6•10	波导管終端器及衰減器·····	269
6•11	波导管四路橋式電路·····	274
6•12	定向耦合器·····	280
6•13	波导管電磁波模式的轉換·····	284
6•14	旋轉接頭·····	290
第七章 微波量測技術		
7•1	總 述 ·····	293
7•2	微波波長的量測·····	294
7•3	微波功率的量測·····	301
7•4	阻抗的量測·····	317
7•5	脈沖波形和頻譜測量·····	324
7•6	同步示波器·····	342
7•7	諧振腔參量的測量·····	344
附录一	·····	354
附录二	·····	358
附录三	·····	360

第一章 緒 論

1.1 总 述:

超高频技术和超高频管在廿世紀的三十年代和四十年代中获得了迅速的發展，它的成就是由于近代科学的提高和無綫电技术的逼急要求所促成的，并且它本身的成就亦成为近代科学和技术上佔主要地位之一的成就。超高频技术和超高频管二者又互相促进了对方的發展，因此二者有着最密切的关系。

在四十年代初，超高频技术主要应用在国防部門，但在五十年代之后超高频技术已广泛应用到許多的科学研究部門和工程技术部門，并由此而兴起了許多嶄新的学科，例如微波頻譜学、射电天文学、超高频气象学等，并且也在原子能研究的範圍內成为重要工具之一。由此可知，超高频技术的範圍已異常广大，远远超出無綫电通訊技术的領域。

超高频技术的頻率範圍可以自 30 兆赫起一直到紅內綫的下端。它所以与普通無綫电技术的頻率範圍划开，而独立成为超高频技术除掉上述广大新穎的許多应用部門外也因为它本身有特殊的物理性質，有別于普通無綫电技术。它的特殊物理性質是由于这个領域中所使用的元件以及客觀实物的尺寸与超高频範圍中的波長有着相近的数量級。因此分佈参量的元件代替了集中参量的元件，形成了新的理論基础。它是超高频管的基础，而超高频管則反过来又促进了超高频技术的發展。

目前超高频已向毫米波段进军，在實驗室中已取得了許多新的产生毫米波的方法，形成更新的超高频管，不久的将来更將扩大超高频技术的領域为人类服务。毫無問題現在已經形成了超高频技术和超高频电子学这两个紧密結合的学科，將來还将形成更紧密的关系。因此在我們从事电子器件制造工作的人，學習这个課目的目标

是既為超高频管打下基礎亦為產生更新的超高频管和器件來促進超高频技術的發展。

1.2 超高频技術的發展過程：

超高频技術的成長是在四十年代前後，是在無線電技術由長波進展到短波之後的基礎上成長起來的。但是我們應知道，証實麥克士偉電磁波理論的赫芝的研究工作是在超高频的範圍進行的，時在十九世紀末頁。他用火花式發射機產生了微弱的超高频，証實了電磁波的反射繞射等的波的性質。但是在赫芝以後，實用的無線電通訊却先走上了長波的途徑，然後再發展到廣播段及短波段，並逐漸向超高频發展。其所以如此，完全是由於當時工業能力的緣故。該時電機工業已能造出幾十千赫以上的高频發電機，因此才步上了長波通訊的途徑。1908年三極電子管發明之後，才使無線電通訊轉入新的一頁，而且無線電技術及電子工程亦由此正式萌芽。

電子管發明後，無線電通訊得到了迅速的發展。應用的頻率逐漸提高，步入了短波，並向超高频率發展。可是普通的電子管在進入超高频的範圍之後顯出了許多缺點，當時缺少能滿意產生超高频率的管子 and 任何器件。直到超高频領域中的特殊物理性質在使用分佈參量元件而得到逐步明了之後，始提高了電子管的高頻率性質，管子振盪的頻率如逐步提高。超高频技術本身的發展首先是在諧振綫上，繼而進展到其他的傳輸系統，逐步明了波導管和諧振腔以及各式各樣的微波元件，形成今日的超高频技術和它獨特測量方法與設備，形成一個獨立的領域並在它的基礎上發展了一系列的應用。

1.3 超高频技術的應用部門：

超高频技術在下述各方面佔有主導的地位。

甲、軍事方面：

超高频技術是首先被應用在軍事上的，雷達、導航、導彈、軍用電視、軍用接力通訊等均有賴於超高频技術。我們可以毫不誇大地

說，沒有超高頻就沒有上述各項，對於軍事的價值是不言而喻的。

乙、科學研究方面：

超高頻技術對科學研究也有巨大貢獻。在原子能研究上可以利用超高頻技術使粒子得到綫性加速，有所謂綫性加速器。在天文學方面利用超高頻技術可以擴大人們對天體觀察的窗孔，進一步的認識宇宙空間。在物質的研究方面利用超高頻技術就形成了微波頻譜學，它在量測的準確度上勝過光譜學的方法。在氣象方面利用超高頻技術也形成了微波氣象學，對預測氣候有重大的貢獻。此外，不論是在生物學上，醫學上，以及工業的各個部門上均有他的特殊效用。對人民經濟上的價值也是不言而喻的。

丙、無線電通訊方面：

超高頻技術是在無線電的基礎上 and 電子學的基礎上發展起來的，毫無問題無線電通訊必然受到超高頻技術的幫助。事實上，今日的电視之所以能如此成功就是直接應用了超高頻技術的結果，而今日的电視頻率也完全是在超高頻的範圍之中，否則清晰的影像是不易得到的。利用超高頻率又開創了無線電接力通訊，可以代替任務日漸頻繁的長距離有綫電訊。民用航行利用超高頻以增進安全和必要時的盲目進港或降落，以及導航，也是任何飛機及海船所必備。對人民的交往和通訊以及宣傳教育上的價值亦是不言而喻的。它的地位是可以與航空噴氣技術以及原子能應用相提並論，是技術科學中的一個主要方面，我們對它應當有足夠的評價。

1.4 超高頻技術中頻率的分段：

目前超高頻率的範圍及頻率分段約有如下情況。

頻 率 (兆 赫)	波 長 (米)
30—300	10—1.0
300—3,000	1.0—0.1
3,000—30,000	0.1—0.01
30,000—	0.01—

根据雷达上的应用，上述頻率范围有如下的波段划分。

波 段 符 号	中 心 波 長 (厘 米)	波 段 范 围	波 段 寬 (百 分 数)
K	1.25		
X _S	3.25	3.15—3.33	12
X _L	3.43	3.33—3.53	
SW ₁	8.285	3550—3700 兆赫	
SW ₂	8.640	3400—3500 兆赫	8.45
SA ₁	9.020	3250—3400 兆赫	
SA ₂	9.455	3100—3250 兆赫	9.23
SS ₁	9.840	3000—3100 兆赫	
SS ₂	10.170	2900—3000 兆赫	6.67
SG ₁	10.515	2800—2900 兆赫	
SG ₂	10.900	2700—2800 兆赫	7.14
C	6.00	3500—6500 兆赫	

第二章 射頻傳輸綫

2.1 总 述:

低頻率工程上傳輸綫仅有傳輸電能的功用，但在高頻工程上，尤其是在超高頻上，它除傳輸電能之外更有着許多其他的应用。例如，它可以作为諧振电路，作为阻抗，作为阻抗匹配的元件，作为电感，作为电容，作为电阻等等。实际上也就因为这許多作元件来应用的概念，才使超高頻工程得到了广泛的發展。

傳輸綫本身具有分佈参数，它的傳輸原理可以用电磁原理或电路原理来分析。前者把傳輸綫看成一种导波的器件，电磁波沿傳輸綫在空間推进；后者把傳輸綫用电压电流的关系进行分析。第二种方法为工程技术人員所熟悉，且較簡單，因此分析傳輸綫时一般仍用电路原理。

分析傳輸綫性質所得到的許多概念均可引用在微波功率的傳輸系統上，例如波導管上。傳輸綫的阻抗概念和阻抗圓圖在波導管工程上也廣泛地應用。因此射頻傳輸綫可以確立許多微波工程的概念，而這許多概念是經常會碰到的。

本章的目的在介紹射頻傳輸綫的基本理論和概念，以及它在超高频技術中的性質和作用。用數理分析也用圖解法來解問題。在超高频及微波技術的應用上，圖解法尤其顯得重要。

2.2 傳輸綫的基本關係式：[1][2][3]

傳輸綫接上電源之後，綫上任一點的電壓和電流的即時值可以用指數式表示為 $U_i = U_i e^{j\omega t}$ 和 $i_i = I_i e^{j\omega t}$ 。在應用復數進行計算時，可將 $e^{j\omega t}$ 略去而在最後的關係式上再行恢復即可重得即時值。

下面我們用復數進行演算與分析。

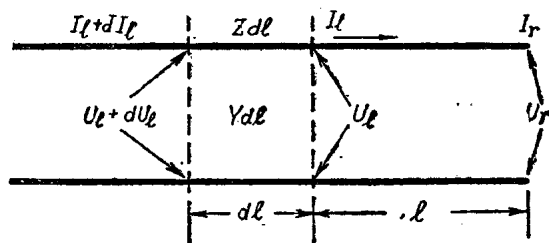


圖 2.1 傳輸綫上的電壓和電流的變動。

如圖 2.1，設在一傳輸綫上距終端 l 處取微分長 dl 段。在 dl 段二端之間電壓及電流大小的變動設為 dU_i 及 dI_i ，它與綫上參數之間的關係為

$$dI_i = U_i Y dl \quad (2.1)$$

$$dU_i = I_i Z dl \quad (2.2)$$

或

$$\frac{dI_i}{dl} = Y U_i \quad (2.3)$$

$$\frac{dU_l}{dl} = Z I_l \quad (2.4)$$

繼續對長度微分，得

$$\frac{d^2 I_l}{dl^2} = Y \frac{dU_l}{dl} = Z Y I_l \quad (2.5)$$

$$\frac{d^2 U_l}{dl^2} = Z \frac{dI_l}{dl} = Z Y U_l \quad (2.6)$$

式(2.5)及(2.6)是傳輸綫的兩個基本式，傳輸綫上各點的數值必須符合這兩個關係式，換言之這兩個關係式的解，表示傳輸綫上的情況。

式(2.5)及(2.6)是二次微分方程式，如用算子的方法，得

$$\frac{d^2 I_l}{dl^2} - ZY I_l = (p^2 - ZY) I_l = 0$$

故

$$p = \pm \sqrt{ZY}$$

其答案為

$$I_l = A_1 e^{-pl} + B_1 e^{pl} = A_1 e^{-\sqrt{ZY}l} + B_1 e^{\sqrt{ZY}l} \quad (2.7)$$

$$U_l = A_2 e^{-pl} + B_2 e^{pl} = A_2 e^{-\sqrt{ZY}l} + B_2 e^{\sqrt{ZY}l} \quad (2.8)$$

式中 $Z = R + j\omega L$

$Y = G + j\omega C$

R = 傳輸綫單位長度的電阻

L = 傳輸綫單位長度的電感

G = 傳輸綫單位長度的電導

C = 傳輸綫單位長度的電容

A_1, A_2, B_1, B_2 均為未定常數。

未定常數可以由傳輸綫的始端情況或終端情況來決定。但在超高频工程的应用上，終端電壓可以由測量得到，因此我們選用終端數值作為參據。設終端電壓及電流分別測定為 U_r 及 I_r 。則在綫的

終端，即 $l=0$ 处，式(2.7)及(2.8)为

$$I_r = A_1 + B_1 \quad (2.9)$$

$$U_r = A_2 + B_2 \quad (2.10)$$

將式(2.7)及(2.8)对 l 微分，并將式(2.3)及(2.4)的关系代入，得

$$I_l Z = -\sqrt{ZY} A_2 e^{-\sqrt{ZY} l} + \sqrt{ZY} B_2 e^{\sqrt{ZY} l}$$

$$U_l Y = -\sqrt{ZY} A_1 e^{-\sqrt{ZY} l} + \sqrt{ZY} B_1 e^{\sqrt{ZY} l}$$

在終端，即 $l=0$ 处，得

$$I_r Z = -\sqrt{ZY} A_2 + \sqrt{ZY} B_2 \quad (2.11)$$

$$U_r Y = -\sqrt{ZY} A_1 + \sqrt{ZY} B_1 \quad (2.12)$$

解式(2.9)，(2.10)，(2.11)及(2.12)得

$$A_1 = \frac{1}{2} \left(I_r - U_r \sqrt{\frac{Y}{Z}} \right) \quad (2.13)$$

$$B_1 = \frac{1}{2} \left(I_r + U_r \sqrt{\frac{Y}{Z}} \right) \quad (2.14)$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \left(U_r - I_r \sqrt{\frac{Z}{Y}} \right) = -Z_0 A_1 \quad (2.15)$$

$$B_2 = \frac{1}{2} \left(U_r + I_r \sqrt{\frac{Z}{Y}} \right) = Z_0 B_1 \quad (2.16)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (2.17)$$

代入式(2.7)及(2.8)，得綫上电压及电流的方程式为

$$\begin{aligned} I_l &= \frac{1}{2} \left(I_r + \frac{U_r}{Z_0} \right) e^{\Gamma l} + \frac{1}{2} \left(I_r - \frac{U_r}{Z_0} \right) e^{-\Gamma l} \\ &= I_r \left(\frac{e^{\Gamma l} + e^{-\Gamma l}}{2} \right) + \frac{U_r}{Z_0} \left(\frac{e^{\Gamma l} - e^{-\Gamma l}}{2} \right) \\ &= I_r \cos h \Gamma l + \frac{U_r}{Z_0} \sin h \Gamma l \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned}
 U_l &= \frac{1}{2}(U_r + I_r Z_0) e^{\Gamma l} + \frac{1}{2}(U_r - I_r Z_0) e^{-\Gamma l} \\
 &= U_r \left(\frac{e^{\Gamma l} + e^{-\Gamma l}}{2} \right) + I_r Z_0 \left(\frac{e^{\Gamma l} - e^{-\Gamma l}}{2} \right) \\
 &= U_r \cosh \Gamma l + I_r Z_0 \sinh \Gamma l \\
 &= Z_0 \left[\frac{1}{2} \left(I_r + \frac{U_r}{Z_0} \right) \right] e^{\Gamma l} - Z_0 \left[\frac{1}{2} \left(I_r - \frac{U_r}{Z_0} \right) \right] e^{-\Gamma l} \quad (2 \cdot 19)
 \end{aligned}$$

式中 $\Gamma = \sqrt{ZY} = \beta + j\alpha$.

方程式(2·18)及(2·19)是綫上电压及电流的关系式，在射頻傳輸綫上用指数式較為方便。

2·3 傳輸常数及特性阻抗:

在上式中，我們曾用

$$\Gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \beta + j\alpha \quad (2 \cdot 20)$$

故

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (RG - \omega^2 LC) \right]} \quad (2 \cdot 21)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (RG - \omega^2 LC) \right]} \quad (2 \cdot 22)$$

在射頻傳輸綫上， $R \ll \omega L$ ， $G \ll \omega C$ ，所以

$$\begin{aligned}
 \beta + j\alpha &= \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \\
 &= \sqrt{j^2 \omega^2 LC \left(\frac{R}{j\omega L} + 1 \right) \left(\frac{G}{j\omega C} + 1 \right)} \\
 &= j\omega \sqrt{LC} \left(1 + \frac{R}{j\omega L} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{G}{j\omega C} \right)^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned}$$

用二項式定理展开，得

$$\begin{aligned}
\beta + j\alpha &= j\omega \sqrt{LC} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{R}{j\omega L} + \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} - 1 \right)}{2!} \frac{R^2}{(j\omega L)^2} + \dots \right\} \\
&\times \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{G}{j\omega C} + \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} - 1 \right)}{2!} \frac{G^2}{(j\omega C)^2} + \dots \right\} \\
&\doteq j\omega \sqrt{LC} \left(1 + \frac{R}{2j\omega L} \right) \left(1 + \frac{G}{2j\omega C} \right) \\
&= j\omega \sqrt{LC} \left(1 - j \frac{R}{2\omega L} - j \frac{G}{2\omega C} - \frac{RG}{4\omega^2 LC} \right) \\
&\doteq j\omega \sqrt{LC} + \omega \sqrt{LC} \left(\frac{R}{2\omega L} + \frac{G}{2\omega C} \right) \\
&= \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) + j\omega \sqrt{LC} \quad (2.23)
\end{aligned}$$

故
$$\beta \doteq \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) \quad (2.24)$$

$$\alpha \doteq \omega \sqrt{LC} = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.25)$$

上式中 Γ = 傳輸常數

β = 衰減常數

α = 相位常數。

由式(2.7)及(2.8)如果傳輸綫是無窮長，則

$$I_l = A_1 e^{-\Gamma l} + B_1 e^{\Gamma l} = B_1 e^{\Gamma l}$$

$$U_l = A_2 e^{-\Gamma l} + B_2 e^{\Gamma l} = B_2 e^{\Gamma l} = Z_0 B_1 e^{\Gamma l}$$

故

$$\frac{U_l}{I_l} = Z_0 \quad (2.26)$$

式(2.26)說明在無窮長的綫上，任一点的阻抗均為 Z_0 ， Z_0 稱為傳

輸綫的特性阻抗。因 $e^{-\Gamma l}$ 項等于零，無窮長的綫上沒有反射波，綫上各点阻抗均等于特性阻抗，此特性阻抗的数值为

$$\begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{Z/Y} = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \\ &= \sqrt{\frac{L}{C} \left(\frac{1 + \frac{R}{j\omega L}}{1 + \frac{G}{j\omega C}} \right)} \\ &\doteq \sqrt{\frac{L}{C} \left(\frac{1 + \frac{R}{2j\omega L}}{1 + \frac{G}{2j\omega C}} \right)} \end{aligned}$$

在射頻傳輸綫， $R \ll \omega L$ ， $G \ll \omega C$ ，故

$$Z_0 \doteq \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.27)$$

所以特性阻抗几乎等于一純电阻。

2.4 傳輸綫上的波速：

綫上电压及电流的即时关系式为

$$I_t = \left\{ \frac{1}{2} \left(I_r + \frac{U_r}{Z_0} \right) e^{(\beta + j\alpha)l} + \frac{1}{2} \left(I_r - \frac{U_r}{Z_0} \right) e^{-(\beta + j\alpha)l} \right\} e^{j\omega t}$$

$$U_t = \left\{ \frac{1}{2} (U_r + I_r Z_0) e^{(\beta + j\alpha)l} + \frac{1}{2} (U_r - I_r Z_0) e^{-(\beta + j\alpha)l} \right\} e^{j\omega t}$$

或

$$\begin{aligned} I_t &= \frac{1}{2} \left(I_r + \frac{U_r}{Z_0} \right) e^{\beta l} e^{j(\omega l + \alpha l)} + \frac{1}{2} \left(I_r - \frac{U_r}{Z_0} \right) e^{-\beta l} e^{j(\omega l - \alpha l)} \\ &= \frac{1}{2} \left(I_r + \frac{U_r}{Z_0} \right) e^{\beta l} e^{j\omega \left(t + \frac{l}{\omega/\alpha} \right)} + \frac{1}{2} \left(I_r - \frac{U_r}{Z_0} \right) e^{-\beta l} e^{j\omega \left(t - \frac{l}{\omega/\alpha} \right)} \end{aligned}$$

(2.28)

$$U_l = \frac{1}{2}(U_r + I_r Z_0) e^{\beta l} e^{j\omega\left(t + \frac{l}{\omega/\alpha}\right)} + \frac{1}{2}(U_r - I_r Z_0) e^{-\beta l} e^{j\omega\left(t - \frac{l}{\omega/\alpha}\right)} \quad (2.29)$$

式(2.28)及(2.29)等号右方第一项是入射波，第二項是反射波。

我們所以說它是波，因为它是以一定的速度在行进，这可以由 $\omega\left(t + \frac{l}{\omega/\alpha}\right)$ 来判别。如果它确是电波，且以一定速度在綫上行进，那么經過時間 Δt 后必定走一距离 Δl 而电波的大小未变，即

$$\omega\left(t + \frac{l}{\omega/\alpha}\right) = \omega\left[(t + \Delta t) + \frac{l + \Delta l}{\omega/\alpha}\right]$$

或
$$\omega\left(\Delta t + \frac{\Delta l}{\omega/\alpha}\right) = 0$$

得
$$\frac{\omega}{\alpha} = -\frac{\Delta l}{\Delta t} = -v \quad (2.30)$$

因此电压或电流是以一定的速度 $\frac{\omega}{\alpha} = v$ 运行于綫上。式中負号表示进行方向是由始端至終端，因为我們取的距離是以終端为参据。

由式(2.25)，射頻傳輸綫上的波速为

$$v = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{或} \quad \alpha = \omega \sqrt{LC} \quad (2.31)$$

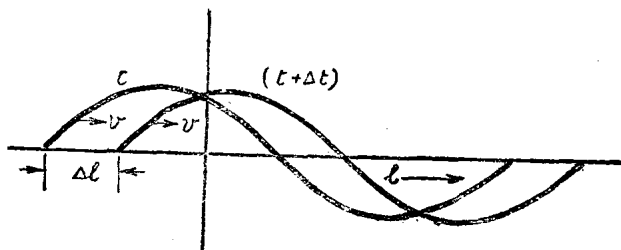


圖 2.2 綫上行波。

在一般架空双根明綫上：