

超 高 頻 技 術

И. В. 列別捷夫講
成都電訊工程學院第五系
503 教研組譯

高等教育出版社

73.69
191



超 高 頻 技 術

И. В. 列別捷夫講

成都電訊工程學院第五系 503 教研組譯

2530/10

高 等 教 育 出 版 社

本書系根据苏联專家列別捷夫 (И. Б. Лебедев) 博士于 1956—1957 年度在成都電訊工程學院為電子器件系超高频專業的教師、研究生及進修教師所講授的課程“超高频技術”的講稿翻譯而成。作者所著的類似的書在蘇聯曾由莫斯科動力學院出版，作為教學參考書之用。

本書除了緒論，附錄及參考書刊外共包括十一章。第一章為超高频率傳輸綫（概述）；第二章為傳輸綫理論的一般問題；第三章為規則波導中場方程式的求解方法；第四章為矩形截面的波導；第五章為圓形截面的波導；第六章為能量沿波導的傳播；第七章為波導中的不均勻性等效綫路；第八章為駐波及匹配；第九章為波導技術元件；第十章為空腔諧振器；第十一章為結束語。

本書可作高等院校超高频電子學專業有關課程的教材，對於其他有關超高频技術的專業也有參考的價值；本書亦可供科學研究人員以及工程技術人員閱讀。

本書由成都電訊工程學院劉盛綱翻譯，由劉樹杞、王祖耆、魏志遠等全體超高频教研組教師、進修教師及研究生集體校訂。

超 高 頻 技 術

И. Б. 列別捷夫講

成都電訊工程學院第五系 503 教研組譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺 7 號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第 034 號)

上海市印刷五廠印刷 新华書店發行

統一書號 15010·648 開本 850×1163 1/32 印張 11 1/16 插頁 1
字數 266,000 印數 2,801—6,300 定價(4) 1.50

1958 年 6 月第 1 版，1959 年 6 月上海第 3 次印刷

序

本書是由作者于1956—1957 学年为成都電訊工程學院电子器件系的教师及研究生所講授的課程“超高频技术”的講稿扩充而成。供学生用的类似的教程曾由作者于1955—1956 学年在苏联莫斯科动力学院分成兩册出版。

本書是作为电子学專業的教材之用，而不能看作是有关波导及諧振腔的全面性指南。超高频技术的很多問題，例如天綫，無綫电波的傳播，介質波导等在这里都完全没有涉及。本書主要着重于現象的物理本質。

本書不包含原理上新的东西。現有的苏联作者的^[1-7]及其他作者的著作^[8-28]对于相应的問題都有更加深入的闡述。書中所提到的部分問題是由期刊上摘引下来的。由于材料非常多以及这些材料分散在各种書刊中，故学生及新教师在研究本課程时，直接利用这样多的書刊是有困难的。然而，为了更深入地研究超高频技术，利用补充参考書也是完全必要的^①。

本書的翻譯工作是由成都電訊工程學院教师刘盛綱完成的。作者在講課时及在本講稿准备付印时得到刘盛綱同志極大的帮助，特向他表示深深的感謝。作者对成都電訊工程學院电子器件系的教师、研究生及进修教师們在本書最后校訂时所集体完成的工作謹致謝忱。

① 参考書目見書末，其中未列入期刊。

譯者序

苏联專家列別捷夫 (И. В. Лебедев) 博士于 1956 年冬起在我們學院進行講學。講課的對象是本系 503 教研組的教師、研究生以及各兄弟院校的進修教師。專家準備講授三門專業課程，即：“超高频技術”，“超高频管”及“超高频管的測試”。本書系“超高频技術”講稿的譯本，其餘兩講稿的譯本將陸續付印。

本書的特点是述理清晰，特別着重于物理概念，對於比較重要的問題也作了詳盡的數學分析。例如在討論具體類型的波導之前，即先詳細地分析了一般波導的普遍理論，然後引入電磁波在波導中傳播及各種有關參數的物理意義，這對全面及深入理解任何類型波導的性能都是很有幫助的。

本書另一特點是內容扼要，選材及組織安排都恰當，而理論和實際的聯繫又很好，例如不僅闡述了波導及諧振腔的理論，並且對於它們的實際應用及測量技術，也作了詳細的介紹。

因此，本書原稿在培養與提高所有聽課教師和研究生的業務水平上，起了很大的作用。我國超高频電子學的發展在解放後才開始，有關中文書籍目前尚遠不能滿足需要，因此本書中譯本的出版，不但可以用作高等學校超高频電子學專業的教材，對於其他有關超高频技術的專業也有參考的價值，同時相信對我國超高频電子學的發展將會有一定的幫助。

在翻譯的工作中，雖然對於有關超高频的技術名詞曾作了較為慎重的討論，但錯誤和不妥之處，尚在所難免，希望讀者不吝指正。

最后，謹在此向列別捷夫博士對於我們各方面的幫助表示無限的感謝。

成都電訊工程學院第五系

1957年5月

目 录

序.....	6
譯者序.....	7
緒論.....	1
§1. 超高頻率波段的特性	1
§2. 超高頻技术及超高頻管的發展阶段	4
§3. 雷达站的物理原理及其裝置的概念	7
§4. 雷达站中超高頻电真空器件的工作条件	14
§5. 雷达站的高頻系統.....	19
第一章 超高頻率傳輸綫(概述)	21
§1.1. 普通傳輸綫的类型.....	21
§1.2. 波导的概念.....	24
第二章 傳輸綫理論的一般問題	27
§2.1. 引言.....	27
§2.2. 任意傳輸綫的波方程式.....	28
§2.3. 标量波方程式的解.....	31
§2.4. 在傳輸綫中的相速度及波長. 色散.....	34
§2.5. 临界波長与临界頻率.....	39
§2.6. 有縱向場分量的波存在的可能性.....	41
§2.7. 准繩 $\nabla_{xy}^2 \neq 0$ 的物理意义	44
§2.8. 沿綫傳播波的群速度.....	45
§2.9. 沿傳輸綫傳播的波的类型.....	48
§2.10. TEM型波的普遍方程式.....	50
§2.11. TE及TM型波的普遍方程式	52
§2.12. 傳輸綫的特征阻抗	54
§2.13. 傳輸綫一般性質的总结	58
第三章 規則波导中場方程式的求解方法	59
§3.1. 初始条件.....	59
§3.2. 赫茲电矢量.....	60
§3.3. 赫茲磁矢量.....	63

第四章 矩形截面的波导	67
§ 4.1. TE 型波电场及磁场分量的确定	67
§ 4.2. TM 型波电场及磁场分量的确定	72
§ 4.3. 矩形波导中的临界波长及波的色散	75
§ 4.4. 矩形波导中 TM 型波场的结构	79
§ 4.5. 矩形波导中 TE 型波场的结构	84
§ 4.6. 矩形波导壁中的电流	89
§ 4.7. 部分波的概念	94
第五章 圆形截面的波导	99
§ 5.1. 起始情况	99
§ 5.2. 圆形波导中的 TM 型波	101
§ 5.3. 圆形波导中的 TE 型波	107
§ 5.4. 同轴綫中的高次型波	110
第六章 能量沿波导的传播	115
§ 6.1. 波导的激励	115
§ 6.2. 波导的击穿强度	120
§ 6.3. 有关超高频气体放电的一些知識	122
§ 6.4. 波导中的损耗	125
§ 6.5. 电介质填充的波导	130
§ 6.6. 波型、波导截面尺寸及形状的选择	132
§ 6.7. 截止状态下的波导(过極限波导)	137
第七章 波导中的不均匀性; 等效綫路	142
§ 7.1. 引言	142
§ 7.2. 矩形波导的特征阻抗及等效阻抗	145
§ 7.3. 匹配、波导的空載与短路	150
§ 7.4. 矩形波导中的膜片	152
§ 7.5. 諧振窗	156
§ 7.6. 波导的分支(T 形接头)	163
§ 7.7. 波导 T 形接头的应用, 天綫轉換开关的概念	169
§ 7.8. 波导桥形连接	173
§ 7.9. 波导中的其他不均匀性	178
第八章 駐波及匹配	181
§ 8.1. 反射系数及駐波的特性	181
§ 8.2. 駐波系数	185
§ 8.3. 超高频傳輸綫中匹配的作用	189
§ 8.4. 超高频傳輸綫的全阻抗圓圖	195

§ 8.5. 圓圖的基本应用	201
§ 8.6. 超高频阻抗变换器	206
§ 8.7. 匹配的其他問題	214
第九章 波导技术元件	218
§ 9.1. 波导的連接	218
§ 9.2. 波导及同軸綫中的短路活塞	222
§ 9.3. 全匹配負載(吸收器)。热量計式功率測量計的概念	227
§ 9.4. 衰波器	231
§ 9.5. 檢波器接头及热敏电阻接头。热敏电阻电桥的概念	241
§ 9.6. 測量綫	248
§ 9.7. 定向耦合器	252
§ 9.8. 定向耦合器的应用	258
§ 9.9. 其他波导器件	264
第十章 空腔諧振器	271
§ 10.1. 引言	271
§ 10.2. 空腔諧振器品質因数的概念	275
§ 10.3. 諧振腔的固有品質因数,有載品質因数及外界品質因数	279
§ 10.4. 空腔諧振器的計算方法	284
§ 10.5. 四分之一波長及半波長同軸綫型諧振腔	291
§ 10.6. 电容負載的同軸綫型諧振腔	297
§ 10.7. 角柱形空腔諧振器	301
§ 10.8. 圓柱形空腔諧振器	305
§ 10.9. 环形諧振腔	313
§ 10.10. 空腔諧振器与負載的耦合。諧振腔的激励	318
§ 10.11. 有关測量空腔諧振器參量的概念	322
§ 10.12. 空腔諧振器的形狀及振蕩模式的选择	327
第十一章 結束語	330
§ 11.1. 波导及諧振腔技术应用的举例	330
§ 11.2. 傳輸綫及超高频振蕩系統的發展前途	333
附录	337
参考書刊	341

緒 論

§1. 超高频率波段的特性

超高频技术与超高频管的发展是近代科学技术的最大成就之一,根据它本身的意义及其发展的速度,超高频技术可以与喷气技术,甚至可与原子能应用相提并论。

在开始研究这一重要的,有兴趣的,同时又是很复杂的技术部门时,必须概述一下超高频技术所包含的一系列的问题,必须指出各种各样的电真空器件在这一技术领域内所占有的地位。

现代所谓超高频率波段(CBQ)一般都理解为在频率大约由 10^8 到 10^{11} 赫范围内的电磁波频段,这一波段在实际上通常都以波长的量值来表征。一米左右或数米的波长可以初步地认为是超高频波段的“长波”界限,“短波”界限一般假定为接近于1毫米左右的波长。在一些外国文献中,经常采用术语“微波”,它也是属于所谈到的频率范围。

为了方便起见,超高频率波段分为“米波”波段($10\text{米} > \lambda > 1\text{米}$),“分米”波段($1\text{米} > \lambda > 10\text{厘米}$),“厘米”波段($10\text{厘米} > \lambda > 1\text{厘米}$),以及“毫米”波段($1\text{厘米} > \lambda > 1\text{毫米}$)。但是,通常都将厘米波波段的观念扩大了,把波长由20—30厘米到1厘米的波段算作厘米波段。在超高频率整个波段范围内,也使用着更为狭窄的实际的波段分割,例如:经常讲到的“10厘米”波段,“3厘米”波段及其他等等。

究竟为什么超高频率波段吸引了特别的注意,并且要与近代

無線電技術中應用的其他一些波段分開來單獨地加以研究呢？仅仅用實際上的重要性以及超高頻率波段的巨大的實用意義來說明這點當然是不可能的。存在有一些非常深奧的物理原理，這些原理既從應用於超高頻率中的無線電技術的線路的觀點上，又從在根本上不同於其他類型電真空器件的超高頻電真空器件的結構及工作原理上把超高頻率波段分別開來，後者對於電子學工程來說特別重要。

1. 使超高頻無線電技術有其自身的特徵的基本物理因素是：其波長及無線電設備的線長度以及地球上的一般物體（建築物，船隻，飛機等）的尺度之間的共度性。在這一方面，超高頻率波段介於“普通的”無線電電波和熱波及光波之間，而我們知道，普通的無線電電波的波長大大超過設備及物體的尺寸，而熱波和光波的波長的数量級則遠小於宏觀物體的尺寸。

超高頻波段的波長與設備尺寸之間的共度性使該波段具有似光特性，即存在有某些與光波波段特性相似的性質。由於似光特性，就可能獲得發射方向性非常好的天線設備，也可以收到由地面上各種物體反射回來的無線電信號。正是這一特性使得超高頻技術在無線電定位中以及在一系列的其他的無線電技術特種部門中獲得了首先的廣泛的應用。

向超高頻率無線電技術的過渡表明了：具有集中參數的普通線路已不適用了，並且要求建立在原理上完全新穎的方法以及建立考慮到波長及電路尺度之間的共度性的新的理論基礎。表征現代超高頻技術的典型的設備就是代替了一般的饋送線及振蕩迴路的波導管與空腔諧振器。那些“習慣”了的元件，如線圈，電容，電阻——所有這些都為在原理上完全不同的裝置所代替了，雖然這些裝置也起着和線圈，電容及電阻相似的作用。

2. 振蕩周期與電子在管內的渡越時間之間的共度性也是給

超高頻率電子學以巨大影響的非常重要的物理因素。這個時間一般在 10^{-9} 秒左右。與低頻振盪周期相比較，例如與工業用電頻率甚至與數兆赫的比較高的頻率相比較，這一時間都可以忽略不計。但是當頻率範圍在 10^8 — 10^{11} 赫時，電子的渡越時間不僅與振盪周期有相同的數量級，甚至可以大大地超過它。

結果，在較低頻率下可看作無慣性繼電器的普通電子器件的工作就發生了根本性的變化。在超高頻率下電子的慣性現象就引起了在低頻率時沒有遇到過的、完全新的特性的出現。要用普通類型的電真空器件實現超高頻率的振盪，放大以及檢波作用，在大多數的情況下都是不可能的。典型的、在原則上不同於普通電子管的近代的超高頻電真空器件是速調管，磁控管及行波管。在這些器件中，電子的渡越時間被有效地加以利用。超高頻電真空器件結構上最大的特點就是在其中直接應用了波導管——諧振腔技術元件。

除了以上所述兩個基本物理特征以外，尚存在有其他一些有趣的超高頻率的特性，特別是超高頻率段無線電波並不由高空大氣游離層反射，而可以毫無阻礙地透過這些游離層。因此，對於人類來說，超高頻率波段是一種特殊的電磁波頻譜的宇宙“窗戶”，它補充了可見光波段的“窗戶”並且給天文學的研究提供了新的廣闊的可能性。

超高頻率波段的一些其他性質，例如生理學及生物學上的作用，到現在為止研究得尚很不够。因此，在將來這一有興趣的電磁波段的各種各樣特性的發明及其應用是可以預期的。

電真空器件在超高頻率波段的發展及掌握上的意義是非常巨大的。可以毫不誇張地說，在這一技術領域內所有主要的成就所以成為可能僅僅是因為建立了很多新型的電真空器件，首先是用來產生超高頻率振盪的器件。

§2. 超高頻技术及超高頻管的發展阶段

超高頻技术的应用仅仅在第二次世界大战的前数年才开始的。虽然超高頻率的很多特性在十九世紀的末年就已經知道了^①，但在1938—1939年前时在超高頻率領域內的工作基本上只具有實驗室研究的特征。

1. 在實驗室研究的早期阶段，注意力主要集中于超高頻率振蕩的产生。集二十年工作的結果，到1939年就找到了并且也加以研究了發生不衰减的超高頻率振蕩的某些原理上新的途徑，例如，發明了各种各样类型的磁控管并加以研究过[哈本(Хабанн)，阿加別(Окабе)，哈尔曼(Хольман)及其他諸人]，也發明了所謂“推斥場电路”[巴克好生(Баркгаузен)，庫茲(Кури)，齐里欽克維奇(Зилитин-кевич)]。也做出了另外一些新型的电子管，特别是用来發生及放大超高頻振蕩的电子射綫器件[阿尔辛也娃(Арсеньева)及海尔(Хейль)，哈也夫(Гаев)，汉恩(Хан)及密脫加夫(Меткаф)等人]。同时普通电子管在超高頻率長波波段的工作也改善了[色繆耳(Сэмюэль)，哈尔曼(Хольман)，立維林(Левеллин)等諸人]。

在探討發生衰减振蕩的方法方面也加以某种注意。在这一方面，А. А. 格拉哥列娃-阿尔卡基也娃(Глаголева-Аркадьева)的工作特別值得加以注意，他建議用“群輻射器”来發生毫米波及超毫米波。

以上所列举出的方法所能發生的振蕩功率一般都很小，效率也是非常小。但是在縮短不衰减振蕩的波長方面获得了很多成就，已可以得到10—20厘米的波(在實驗室的条件下)，甚至在某

^① 讓我們記住：在 Г. 赫茲(Hertz)及 П. Н. 列別捷夫(1895年)所进行的电磁波的始初的物理研究时，就曾經应用了厘米波及毫米波波段的波，这是用火花振蕩器得到的衰减振蕩，并且功率很小。后来当較長波長的無線电通訊發明了以后，在很長的一段时间內这一波段就沒有加以研究。

些情況下可以得到1厘米或更短的波。借助于“群輻射器”所能得到最短的波小於1毫米，即接近於紅外線的波段。

2. 在1939—1940期間，在超高頻率電子學方面獲得了巨大的成就，這标志着超高頻率波段發展的第二階段的開始。在比較短促的時間內研究出一些原理並建立了一些近代新型的超高頻器件的原始的結構，其中首先包括有多腔磁控管[Н. Ф. 阿列克謝也夫 (Алексеев) 及 Д. Е. 馬略羅夫 (Малыров)], 雙腔速調管[華雷安 (Вариан) 兄弟], 反射速調管[Н. Д. 捷維特柯夫 (Девятков) 及 В. Ф. 柯瓦連科 (Коваленко)] 以及可以用於超高頻率波段的特殊結構的三極管 (Н. Д. 捷維特柯夫)。在超高頻率無線電技術領域內波導管的實際應用[騷斯華爾脫 (Саусворт), 貝羅烏 (Берроу), 謝爾古諾夫 (Щелкунов) 及其他諸人] 以及空腔諧振器的建立 [И. С. 聶孟 (Нейман), В. В. 漢森 (Хансен) 等] 大大地促進了超高頻率電子學的發展。

在這一段時期內，超高頻率領域內完成的大部分獨特的奠基工作都是屬於密切注意新的技術領域發展的蘇聯學者們的，這一事實決不是偶然的。美國和德國的學者們在超高頻率波段的發展中也有巨大的貢獻。

在二次世界大戰的年代里，在各國都進行着把超高頻技術用於軍事上，主要是用於無線電定位領域中的巨大工作。超高頻技術也開始應用到導航及遙控等部門中去；反雷達技術也獲得了巨大的發展。實際上應用的波段已經擴展到長度為1厘米的波。在提高振蕩功率及超高頻振蕩器的效率 (К. П. Д.) 方面獲得了特別巨大的成就。例如在1945年10厘米波的脈沖振蕩功率已達到1000瓦，而其效率在40—60%之間。頻率的穩定度也大大地提高了。

雖然獲得了如此巨大的成就，但是理論問題的探討在這一時

期內還遠遠地落后于超高頻率技術的實際應用。

3. 戰後時期可以認為是超高頻率技術及超高頻管發展的第三階段。在這一段時期內，超高頻技術在各種各樣的科學技術領域內的應用擴展了並且正在擴展着。在超高頻率技術的基礎上發展成了一些整套的新的科學領域，例如無線電頻譜學，無線電天文學，無線電氣象學等。超高頻率技術與核子物理學，主要是在基本質點加速器領域內，緊密地錯綜地聯系着。

在通訊及電視的領域內發生了並且正在發生着巨大的變化，因為分米波，厘米波甚至毫米波的應用在這些領域內開拓了新的巨大的可能性（多路中繼綫及波導傳輸綫，地平綫範圍以外的超高頻率通訊及其他）。

超高頻率的方法與技術也廣泛地深入到各種各樣有關物質結構的物理學的研究中去。超高頻率也開始應用到醫學及生物學中去。

在國防技術方面超高頻率波段有着極為重大的意義。用來作為探測及識別，瞄準及自動瞄準，瞄準信號的發現及轟炸及其他等等的雷達系統對於航空及導彈技術的發展有着特殊的意義。反雷達技術的不斷完善就要求建立超高頻反干擾系統可靠的工作。在一些戰略技術上的特性方面，例如作用距離，判斷能力“死區”的大小方面，以及可靠性，能忍耐巨大的機械過負荷的性能等方面向超高頻儀器所提出的要求日益增長着。

除了廣泛的實際應用外，超高頻技術和超高頻管發展的現階段的特点是：作更深入的理論研究並對現有的和不斷出現的豐富的材料加以綜合。

§3. 雷達站的物理原理及其裝置的概念

雷達是超高頻管應用的一個典型的例子。為了很好地說明電

真空器件在雷达设备中的工作特性，讓我們来研究一下雷达站的工作情况。

1. 雷达的基础是無綫电波受不同物体的反射或散射的現象。因为無綫电波傳播速度已知并等于光速，因而决定距目标的距离就归結为測量“探测”信号的輻射与由目标反射信号的接收之間的时间間隔。

通常雷达站的接收机放在与發射机非常接近的地方(圖1)。在这种情况下，由目标物反射回来的信号經過时间間隔 Δt 后將为接收机所接收，而 Δt 等于：

$$\Delta t = \frac{2l}{c}, \quad (1)$$

式中 l 是到目标的距离； c 是眞空中(或者实际上是在空气中)的光速。測量了时间間隔 Δt 以后，就不难根据以下公式来确定到目标物的距离：

$$l = \frac{c \cdot \Delta t}{2}. \quad (2)$$

为了确定目标在空間的位置(根据一个、两个或三个坐标)，就必须保証輻射的方向性。天綫設備的方向性圖愈尖銳，雷达站就有愈好的判断能力，例如方位角的判断能力。如前所述，正是这一特性决定了要选择超高频波段。波長愈短(在同样尺寸的天綫情况下，例如抛物鏡面的天綫)，則輻射設備就有愈为良好的方向性。

2. 为了观察反射信号，希望發射机信号的輻射在反射信号来到以前就終止。这样就要求雷达站發射机的工作是脉冲狀

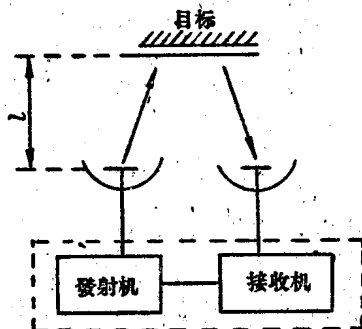


圖1. 具有分別的發射机天綫裝置及接收机天綫裝置的雷达站。

态的 Φ 。

脉冲持續期 τ 决定了靠近雷达站的“死区”以及雷达站的距离判断能力,即將位于同一方向,但距雷达站距离不同的两个目标分辨出来的能力。以 $l_{\min}$ 来表示雷达站可以判断出来的两目标之間的最小距离,則根据公式(1)可以写成:

$$\tau \leq \frac{2l_{\min}}{c} \quad (3)$$

脉冲重复周期 T (見圖 2) 可由以下条件来确定: 即到下一發

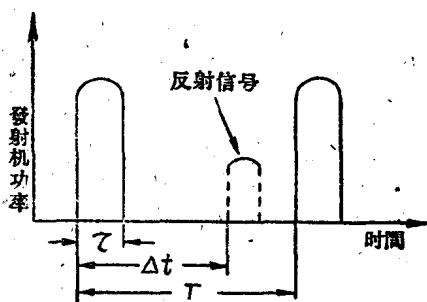


圖 2. 雷达站發射机的脉冲运用状态,关于脉冲波形的问题,以后再加討論。

射机的脉冲开始以前,必須把由最远的目标反射来的信号脉冲接收进来。以 $l_{\max}$ 来表示該雷达站的最大作用距离,那么,与不等式(3)一样,不难求得:

$$T \geq \frac{2l_{\max}}{c} \quad (4)$$

作为一个例子,讓我們

假定: $l_{\min}$ 等于 200 米, $l_{\max}$ 选择为 100 千米。在这种情况下,根据式(3)及(4)得:

$$\tau \leq \frac{2 \times 200 \text{ 米}}{3 \times 10^8 \text{ 米/秒}} \cong 1.33 \times 10^{-6} \text{ 秒},$$

即

$$\tau \leq 1.33 \text{ 微秒};$$

$$T \geq \frac{2 \times 100 \times 10^3 \text{ 米}}{3 \times 10^8 \text{ 米/秒}} \cong 0.67 \times 10^{-3} \text{ 秒},$$

即

$$T \geq 0.67 \text{ 毫秒}.$$

脉冲重复频率 f_{imp} 等于:

$$f_{\text{imp}} = \frac{1}{T} \quad (5)$$

① 也可能建立一些其發射机是工作在持續状态下而雷达站,然而工作在脉冲状态下的雷达站是最典型的。