

精益设计

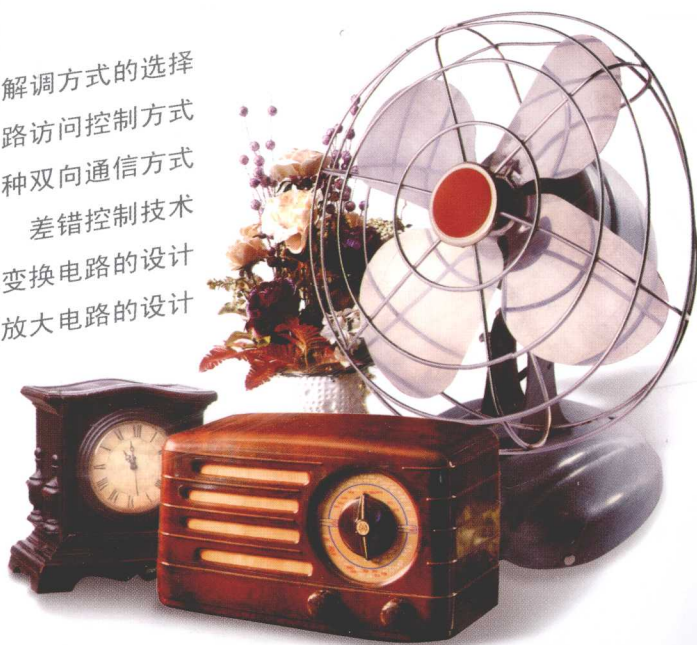
Lean Design

(日) 藤田 昇·著

彭刚·译

活学活用高频电路

调制解调方式的选择
多路访问控制方式
各种双向通信方式
差错控制技术
频率变换电路的设计
高频放大电路的设计



科学出版社

精益设计

活学活用高频电路

〔日〕藤田 昇 著

彭刚 译



科学出版社

北 京

图字：01-2013-1076号

内 容 简 介

本书以浅显易懂的方式介绍各种高频电路的应用技巧，内容包括RF、HF、天线的种类及其特征、菲涅耳区和菲涅耳半径、组合逻辑电路和测试平台、高频的弊端、调制解调的方式、多路访问控制方式、无线数字通信质量和安全管理、同轴电缆的衰减量和极限频率、滤波器的种类和特征、高频电路设计的步骤和实例等。

本书可供高等院校计算机、通信、电子信息、自动化等专业师生阅读，也可作为相关技术人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

活用活用高频电路/（日）藤田昇著；彭刚译.—北京：科学出版社，2016.1

ISBN 978-7-03-046372-2

I. 活… II. ①藤…②彭… III. 高频—电子电路 IV. ①TN710.2

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第271174号

责任编辑：杨 凯 / 责任制作：魏 谨

责任印制：赵 博 / 封面设计：张鹏伟

北京东方科龙图文有限公司制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

天津新科印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年1月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2016年1月第一次印刷 印张：13 3/4

印数：1—3500 字数：220 000

定价：39.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

前 言

设计无线系统时，不只是高频电路、调制/解调电路，天线以及传输线路的设计也必不可少，但是，内容包罗万象的书却少之又少。

开始进行无线系统设计时，能否仅仅一本书就能够应付呢？出于此目的，编写了这本书。编写的时候，尽量考虑了少用数学公式。这样说，听起来好像是故意不使用数学公式一样，实际上是因笔者“不学无术”不会使用数学公式，这样认为可能更为贴切。

本书不是设计的指南书，而是以搜罗高频技术的基础知识为目的编写的。高频及其应用技术相关的基本思想是，即使使用的频率不同，也应该得到有效应用。

打算开始设计/构建无线设备或者无线应用系统的话，希望本书能够对读者有所帮助。另外，更期望因为本书能够引起读者对电波与无线设备的兴趣，培育出新的无线电技师。

藤田 昇



第1章 高频的基础知识	1
1.1 载波的频率	1
1.2 高 频	4
1.3 本书的高频定义	7
1.4 高频领域使用的单位	10
1.5 分贝表示的基础和应用	13
1.6 传导电流、位移电流和运流电流	23
第2章 电波的特征与各种性质	27
2.1 电波是电磁波	27
2.2 电磁波的产生原理	29
2.3 电波的各种性质	32
2.4 使用电波必备法律知识	38
2.5 无需许可证的业余电台	39
第3章 天线及电波传播的基础知识	43
3.1 天线特性的基础知识	43
3.2 天线的种类及其特征	50
3.3 阵列天线的特征	56
3.4 电波传播的基础知识	59
3.5 菲涅耳区和菲涅耳半径	64
第4章 高频的多种用途	67
4.1 作为电波的用途	67
4.2 小型化的使用形式	74
4.3 高速处理的使用形式	76

第5章 高频信号的性质 79

- 5.1 电气信号的传递方法 79
- 5.2 阻抗匹配 84
- 5.3 趋肤效应 91
- 5.4 高频的弊端 94
- 5.5 防护指针 99
- 5.6 身边设备的功率通量密度 102

第6章 支持无线数据通信的技术 109

- 6.1 电波通信的优缺点 110
- 6.2 调制解调的方式 112
- 6.3 扩展频谱方式 117
- 6.4 OFDM方式的结构与特征 125
- 6.5 MIMO方式的结构与特征 128
- 6.6 调制解调方式的选择 130
- 6.7 通信方式的种种情况 132
- 6.8 多路访问控制方式 133
- 6.9 各种双向通信方式 138

第7章 无线数字通信质量和安全管理 141

- 7.1 确保通信质量 141
- 7.2 差错控制技术 144
- 7.3 无线通信的安全性 147
- 7.4 避免电波干扰的对策 149

第8章 用于高频电路的设备的基础知识 159

- 8.1 电感、电容器、电阻 159

8.2 高频用晶体管	160
8.3 同轴电缆的种类和结构	163
8.4 同轴电缆的衰减量和极限频率	167
8.5 使用同轴电缆的注意事项	170
8.6 同轴连接器的基础	176
8.7 同轴连接器的种类和特征	177
8.8 使用同轴连接器的注意事项	183
8.9 滤波器的种类和特征	185
8.10 同轴避雷器	187
参考文献	190

第9章 高频电路设计的步骤和实例 191

9.1 功能结构图的制作	191
9.2 制作能级图	192
9.3 天线切换电路	193
9.4 LNA电路设计	195
9.5 频率变换电路的设计	197
9.6 高频放大电路的设计	198
9.7 去耦/偏压电容器的选择方法	199
9.8 特殊的旁路电容器	201
9.9 R系列和E系列的标准数	202
后 记	207
译后记	209

第1章 高频的基础知识

高频是指高频率的交流电气信号。频率 (frequency) (这里指的是电气信号) 是指单位时间内完成振动的次数, 一般一秒为一单位时间, 单位用赫 [兹] (Hz) 表示。单位名称是来自德国物理学家海因里希·鲁道夫·赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz) 的名字。

高频不一定如字面意思所指, 就只是表示高频率, 也包括无线通信和广播用的电波 (载波) 使用的 RF (Radio Frequency), 相对的也包括 HF (High Frequency)。

无线技术人员把载波的频率称作高频 (RF)。按照惯例, 一般的载波 (电波) 都是高频率, 经常把两者混合使用。

1.1 载波的频率

无线通信和广播用的电波用来运送声音和数据信号, 这种电波被称作载波 (carrier); 与此相对, 运送的信号被称作调制信号。

刚开始使用电波进行声音通信的时候, 使用的是载波中的中波范围 (300kHz~3MHz)。声音信号 (调制信号) 的频率范围是300Hz~3kHz, 如文字所述, 载波属于高频 (RF: Radio Frequency), 声音信号属于低频 (AF: Audio Frequency), 如图1所示。

使用载波的频率范围越来越广, 从潜伏在深海的核潜艇使用的极低的频率 (至少比商用电源的频率低45Hz) 到毫米波通信的100GHz以上, 多种频率的电波得到广泛利用。表1总结了频率、波长以及相应名称。

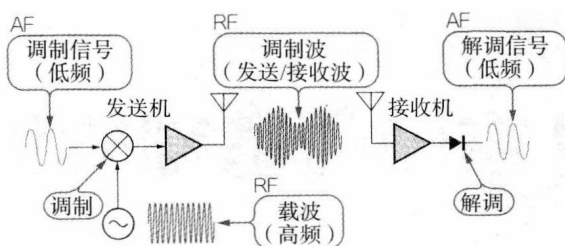


图1 载波（高频）和调制信号（低频）

表1 无线频率（波长）及其称呼（简称）、主要用途

频率	波长	简称	名称	主要用途
30~300Hz	1000km~10000km	—	—	潜艇通信
300Hz~3kHz	100km~1000km	ULF	极超长波	潜艇通信
3kHz~30kHz	10km~100km	VLF	超长波	位置标记
30kHz~300kHz	1km~10km	LF	长波	位置标记、标准电波
300kHz~3MHz	0.1km~1km	MF	中波	中波无线电广播、船舶通信
3MHz~30MHz	10~100m	HF	HF 短波	短波无线电广播、船舶通信
30MHz~300MHz	1~10m	VHF	超短波	无线电广播、各种移动通信
300MHz~3GHz	0.1~1m	UHF	极超短波	无线电广播、手机、无线 LAN
3GHz~30GHz	1~10cm	SHF	厘米波	卫星通信、雷达、多重无线、无线 LAN
30GHz~300GHz	1~10mm	EHF	毫米波	卫星通信、地球探测、电波天文
300GHz~3THz	0.1~1mm	—	亚毫米波	—

比声音频率（低频）更低的频率也被用作载波，在无线通信系统中，载波的频率全被称作高频（RF）。

并且，当初的低频是指声音信号的频率，即使是在声音范围以外的频率信号——语音频带信号，也被称作低频信号。一般情况下，相同的调制信号，在数字通信中，被称作基带（BB：Base Band），在影像信号中，被称作视频信号。

现在大部分的接收装置都是采用超外差（super-heterodyne）方式对接收装置的频率进行放大或者处理，使其变换为另一种频率，因此，在接收装置内部，存在着被称为中频的信号（IF：Intermediate Frequency）。超外差方式的典型例子，如图2的中波广播系统图所示。如图所示，高频（RF）是535kHz~1605kHz，中频（IF）是455kHz，低频（AF）是100~5000Hz。

一般情况下，中频信号的频率比高频信号的频率低，但是，也会出现中频信号频率较高的情况。例如在全频带无线电接收机（可以连续接收从100kHz长波到30MHz短波的接收装置）中，超过最高收信频率2倍以上的70MHz中就存在

中频。

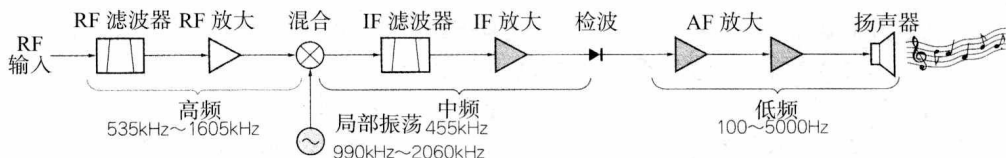


图2 中波无线电广播的系统及频率分配的例子

没有“超”字的外差方式

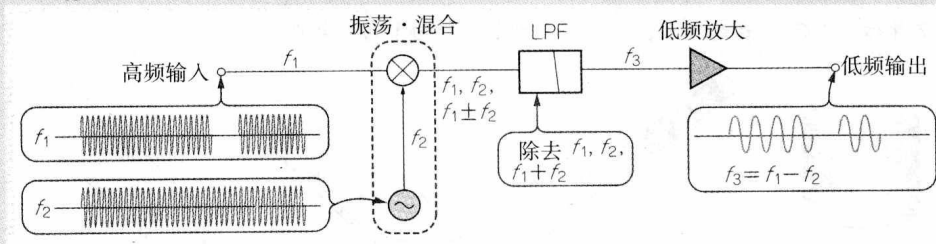
既然有超外差方式，当然也存在没有加上“超”字的外差方式，可是在生活中并没有得到实际运用。

事实上，在发明超外差方式（1918）之前就已经有外差方式了。

外差方式如图A所示，与接收载波频率 f_1 相近的本地频率 f_2 混合（在真空中混合兼带振荡）之后，就可以把电信信号（无调制载波的断续）当作语音频带 f_3 来听。

其作用和后来的基于BFO的检波是一样的。直接转换系统（direct conversion system）方式可以说是现代的外差方式。

随着电路/零件技术的进步，即使灵敏性、选择性和稳定性不降低，也可以实现外差方式。



图A 外差检波的示意图

这是因为比较高的中频更易提高耐图像性能。可是，在较高的中频中，难以提高选择性，如果再次变换频率，就会下降到更低的第二中频。这样两次变换频率的方式，被称为双超外差方式。

附带说一下，图像（image）是超外差方式的特征，与局部振荡频率相比，更容易接收接近中频频率的信号（一方是希望信号，另一方是图像信号）。

这样的话，像载波这样带有高频意思的频率，不一定就是高频，因目的和装置的不同而不同。例如，最近的高速无线数据通信系统的基带都超过10MHz，中频也有超过几百兆赫的情况。尽管如此，中频广播的535kHz~1605kHz也被称作高频信号。

高频电路的布线又粗又短

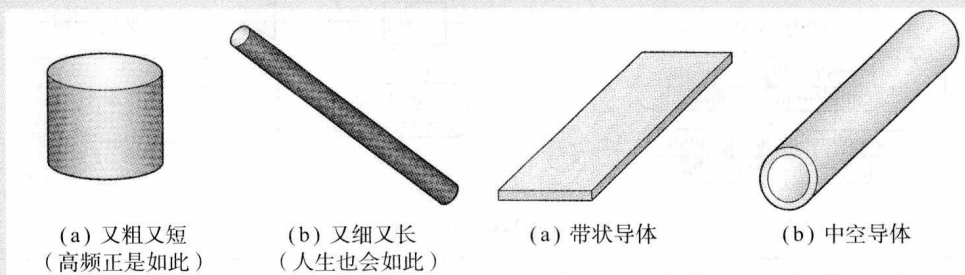
有这样所谓的“又粗又短”的人生：吃想吃的，喝想喝的，说想说的，做想做的，即使因为不注意养生而减少寿命，也不后悔……另一方面，也有“又细又长”的人生：注意健康，抑制欲望，不要期望太多，长生者为胜……人生变化莫测，是个非常复杂的系统，这很正常。人生可又粗又短，又可又细又长，选择过怎样的人生是个人自由，多数的人不会选择走极端之路，而是选择走平平淡淡的中庸之道吧。

因此，高频电路“又粗又短”的原则也是如此（图B）。如果零件尺寸很小，布线又粗又短的话，高频就不是高频了，这是矛盾的说法，即使我们没有意识到是高频，也可以把它当作高频信号来对待。

这里所说的“短”，是针对高频信号的波长。被称作高频的频率范围一定很广（绝对点来说，所有的交流都可以当作高频），每一种的波长都很短。

例如，即使说布线长都是1m，波长都是100m（频率3MHz）的信号十分短，波长1cm（频率30GHz）的信号，却显得十分长。一般情况下，如果布线长少于波长的 $1/10$ ，阻抗匹配完全不用发挥作用。而且，如果布线长少于波长的 $1/100$ ，可以完全忽略布线的长度。

还有，“粗”的布线意味着会减弱寄生电感和寄生电阻，细线的电感反而会变大，带有额外的电阻。并且，依据趋肤效应高频电阻也会随之增加。虽说在同样大小的导体截面积中，表面积越大，趋肤效应的效果越弱，但是如果使用中空棒状导体或者是丝带状的导体（图C），在这点上，可以说印刷电路趋向于高频电路。



图B 又粗又短

图C 减少电感和趋肤效应

1.2 高频

高频，可以通过以下三点来思考。

● 比一般使用频率要高的频率

首先，其意思对于一般使用的频率来说，频率相对较高。

例如，对于音频放大器的技术人员而言，一般使用的频率就是声音频率，大致都是超20kHz的高频。由于近来使用的音频放大器的频率特性更好，因此更有甚者，也会出现超100kHz的情况。

对于使用商业电源的人来说,超过电源频率50Hz/60Hz的频率就是高频了,对于使用开关电源的人来说,高频就是超数百千赫的频率。当然,处于开关电源的开关频率不断变化的时代,最初只要超过20kHz,就是非常优良的高频开关电源了,可是近来,只有超过1MHz的电源才称得上是高频电源。

● 不可忽视寄生电抗的频率

再有,不能忽视电路组成元件的寄生电感和寄生电容的阻抗。例如电阻器,如图3所示,在引线和电阻器中有电感,引线间有电容。

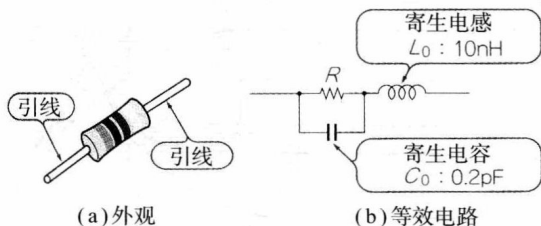


图3 电阻器的等效电路

由于这种电感和电容并不是在预料中产生的,因此被称为寄生电感和寄生电容,总称为寄生电抗。频率一旦变高,由于电阻不能发挥效果,因此与电阻值相比,更不能忽略寄生电抗的阻抗。

根据电阻构造的大小,大致决定了寄生电感和寄生电容。例如,1/4W型的带引线的碳膜电阻器的寄生电容大概是0.2pF,包括两端10mm长的引线,寄生电感大概是10nH。

图3的等效电路的合成阻抗可以用如下式计算:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R}{R^2 + (\omega L_0)^2}\right)^2 + \left(\omega C_0 - \frac{\omega L_0}{R^2 + (\omega L_0)^2}\right)^2}}$$

这里, $\omega = 2\pi f$ 。

图4展示了各种电阻值和寄生电抗的合成阻抗的计算结果。在电阻高的范围内,频率也会变高,由于和串联的寄生电容连在一起,因此合成阻抗就会下降。例如,100kΩ的合成阻抗从1MHz左右开始下降。总之,对100kΩ的电阻而言,超1MHz的信号就是高频率了。

电阻值变低后合成阻抗开始下降的基准频率也会随之升高,当它是1kΩ的时候,就会变成100MHz左右。

更低的电阻值对串联的寄生电感的影响更大,高频的合成阻抗会升高。例

如, 10Ω 的电阻, 合成阻抗从 100MHz 左右开始上升。再有, 在寄生电感和寄生电容的谐振频率中, 阻抗变高, 超过谐振频率, 合成阻抗会再次开始降低。总之, 10Ω 的电阻在 100MHz 到谐振频率的范围中, 会带有电感器的性质, 超过谐振频率的范围, 会带有电容器的性质。

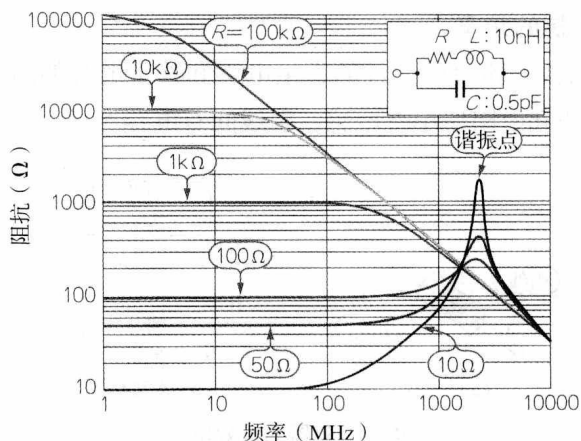


图4 电阻和寄生电抗 (LC) 的合成阻抗

但是, 实际测试电阻, 高频未必就会变得如图4所示。因此, 这里所述的合成阻抗的计算值是以单纯化的等效电路为基础制定的, 实际上, 电阻的寄生电抗分布并不等效。

前面所述, “较一般使用的频率来说, 相对较高的频率” 是高频的定义, 这和不能忽略寄生电抗的频率一样重要。总的来说, 在进行电子机械设计时, 以使用频率为基础, 决定电路元件的常数, 与此相对, 频率一旦变高, 因寄生电抗的影响, 就会发生预想不到的动作。

● 不能忽略波长的频率

构成电路的元件和布线长是波长 (与频率成反比例) 的 $1/10$ 。所以不能忽略波长的长度。例如, 频率为 300MHz 的波长为 1m , 元件尺寸和布线长就是 10cm , 有必要当作高频对待。当然, 不仅是元件尺寸, 也要考虑布线长。

必须要注意的是, 在像印刷电路板这样的电介质上有布线的情况。电介质内或者是其附近的电流信号的速度很慢 (与介电常数的平方根成反比), 波长就会变短。因为环氧玻璃材质的印刷电路板的介电常数是 4.8 , 所以频率为 3GHz 的波长是 45mm ($100/\sqrt{4.8}$)。总之, 不能忽略 5mm 的布线长和元件尺寸。

更加要注意的是, 使用高频设备, 其放大元件的动作频率高于设备本身。因此, 考虑实际使用的频率, 必须至少是高频的 3 倍。总而言之, 在实际电路中,

布线长和电路元件的尺寸使用的频率是波长的 $1/30$ ，当作高频来对待。

那么，究竟为什么不能忽略波长呢？

其一，不能忽略传输线的特性阻抗。特性阻抗是从传输线带有的寄生电容和寄生电感的关系中导出的数值，信号源阻抗=负载阻抗=特性阻抗，不成立的话，就不能有效地传输发射产生的功率。

其二，电波容易被发射。在导线中，有高频电流流动，导线周围就会产生电场和磁场。导线间隔变宽，高频能量就被当作电磁波，向空间发射。

千钧一发

在电影和漫画中经常出现这样的画面——在漆黑中前进的主人公，以及瞄准主人公的敌人。卑鄙的敌人已备有夜视镜，可以清清楚楚地看到主人公。在危机发生的一刻，主人公用闪光，狠狠地灼伤了敌人的眼睛，敌人万分痛苦，主人公趁机逃脱，真是千钧一发啊！

但是，很奇怪！一般的夜视镜是把红外线转化为可视光的指示工具，那个指示器（液晶？），不足以产生可以灼伤眼睛的光。并且，恐怕通过夜视镜看的刺激性少于用眼睛直接看。

因此，敌人肉体痛苦的事情是不可能的（光电转换元件饱和之后，应该是暂时看不到画面的……）。算了，因为是电影和漫画，所以可以允许它无视红外-可视光转换器的动态范围的漏洞。

1.3 本书的高频定义

● 以微波频带为对象

如表2所示，对于高频的定义，随着使用者的不同而不同，本书所讲的是波长影响电路构成元件的物理尺寸的频率。在半导体中，构成一般电子设备的时候，很容易控制元件尺寸和布线长在10mm以下，具体的频率在1GHz以上，也就是说，微波频带成为对象。

附带说明一下，微波频带是指从几吉赫到几十吉赫范围的频率，定义不明确，也有超过几百兆赫的微波频带。

表3表现了微波频带的称呼（符号）。由于它的顺序是按字母顺序排列的，所以频率的区分很随机，虽然很难懂，可毕竟已约定俗成。顺便说一下，据说在战争的时候，研制雷达时使用的频率是秘密，因此才特意随机分配符号的。

并且，一般来说，“构成电路元件的物理尺寸受波长影响的频率”比“不能忽略元件的寄生电感和寄生电容的阻抗的频率”要高。

总之，高频，可以理解为元件的尺寸、布线长和波长的关系，也可以考虑为对寄生电感和寄生电容产生的影响。

表2 本书对高频的定义和相对应的频率的例子

高频的定义		用途等	频率的例子
载波频率（电波）		中频无线电广播	0.5MHz~1.6MHz
		VHF 电视	90MHz~220MHz
		UHF 电视	470MHz~770MHz
		手机	0.8GHz~2.2GHz
		无线 LAN	2.4GHz, 5GHz
		卫星广播	12GHz
相 对 较 高 的 频 率	比一般使用的频率要高的频率	声音领域	2kHz~100kHz 以上
		商用电源	50Hz 或者 60Hz 以上
		开关电源	100kHz~1MHz 以上
		一般人的感觉	20kHz~100kHz 以上
	无法忽略元件的寄生电抗的频率	大型导线元件	10MHz~100MHz 以上
		小型导线元件	100MHz~1GHz 以上
		集成电路片（2012）	1GHz~5GHz 以上
		集成电路片（1005）	2GHz~10GHz 以上
	波长比布线长和电路元件的尺寸要足够短（1/30）的频率	高阻抗电路	1MHz 以上
		尺寸 100m	100kHz
		尺寸 10m	1MHz
		尺寸 1m	10MHz
		尺寸 10cm	100MHz
		尺寸 1cm	1GHz
		尺寸 1mm	10GHz
		尺寸 0.1mm	100GHz

表3 微波带的称呼

Band	频率（GHz）	Band	频率（GHz）
P	0.5~1.0	Ku	12.5~18
L	1.0~2.0	K	18~26.5
S	2.0~4.0	Ka	26.5~40
C	4.0~8.0	V	40~75
X	8.0~12.5	W	75~110

● 根据时代和使用功率的不同，定义不同

曾经，高频电子电路是由真空管构成的。一般说来，小型的真空管的尺寸是几厘米，布线长超10厘米。因此，信号频率大概超10MHz，必须当作高频对待。一超过300MHz，就要使用空腔谐振器等的分布常数元件这样庞大的电路结构。

现代，大多数的电子设备或者是电子元件都越来越小，印刷电路板的电路布线长，大多数也只有几厘米甚至更短。因此完全没有意识到300MHz的程度就是高频。

例如，在IC内部的电路中，元件尺寸变小，布线长变短。电脑用的高速CPU的时钟频率也有超3GHz，在10mm × 10mm以下的芯片上运行，完全感觉不到波长的短。

但是，由于从芯片到封装的布线和IC表面的总线布线等的长度都变长，因此，电脑的总线时钟的频率要比CPU内部的时钟的频率低。

近来，无线通信系统所有的功能都记录在芯片上。例如，无线LAN用芯片不仅包含2.4GHz / 5GHz的收发电路和高速控制电路这样的模拟电路，还有通信控制电路和控制电路（CPU）等的数字电路，这些内容全部记录在只有几毫米大小的芯片上。

但是，大功率电路工作时会产生热量，所以为了散热，元件尺寸越来越大。需要注意的是，尺寸变大后，进行高频处理时频率会降低。

理解看不见的电路

高频电路和低频电路都可以用电路图（等效电路）表示。在电路图中，可以用符号来表示电阻器、电容器等，原则上，高频电路和低频电路都可以使用同一符号（电路符号）。

但是，符号到底还是符号，例如电阻器除了电阻部分之外，还有寄生电抗（电感和电容），这些都被电路符号省略了。

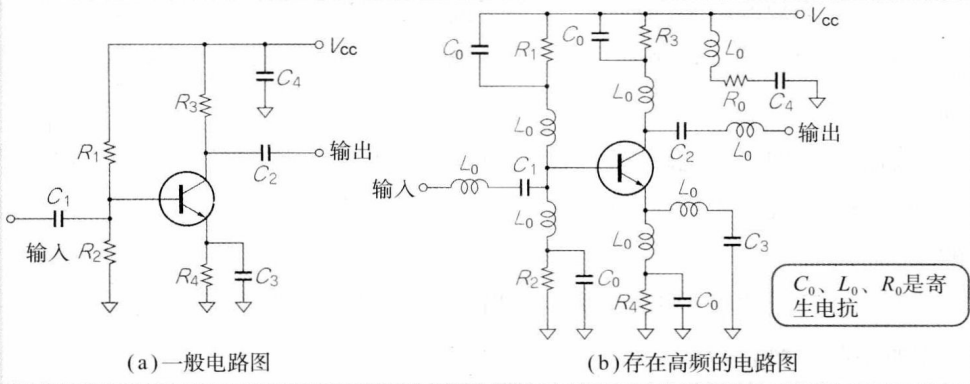
在低频电路中，即使忽略寄生电感和寄生电容，也没有关系，而高频电路就未必如此了。但是，由于各元件的寄生电抗并没有明确的规定，逐一描绘显得很繁杂，所以一般都是省略。

在描绘中，布线单纯表现为布线，但实际上，依然存在寄生电抗。还有，只有在成对的导体（一般为接地）中，电流才能流动的情况下，也没有必要在电路图中画出成对的导体。例外的就只有同轴电缆和双绞线了吧。

既要读取电路图中没有被描绘出来的部分，又要考虑电路图元件配置，印制图形的设计至关重要（图D）。不这样做的话，在制作电路的实际操作上，就不能如愿动作。电阻器和电容器的寄生电抗，大多数情况下，都不清楚记录在说明书上。最近，发表了当作仿真器用的参数（S参数等）。

另外，即使在图D（b）这样的成对导体间（布线和元件间）的寄生电抗，也没有被表示在图上。但是这样做的话，会对电路的实际操作产生影响，除了像微带线等这样的预想的部分以外，其他的部分很难在图上进行表示。

虽然可以利用电磁场解析仿真器进行仿真，但高性能的仿真器非常贵，并不是谁都能使用。在这一点上，我们更应该依靠对高频电路的经验和感觉了吧。



图D 解读存在高频的电路

1.4 高频领域使用的单位

● 国际单位制

物理量的单位是由国际统一的SI决定的。SI如表4所示，由7个基本单位和由基本单位导出的组合单位构成。并且，为了表示大量 / 小量，制定了表5所示的词头。这种使用方法是JIS（日本工业标准）中的Z8203条所规定。

表4 SI基本单位

量	符号	名称	定义
时间	s	秒	铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9192631770个周期的持续时间
长度	m	米	1/299792458秒的时间内光在真空中行进的距离
质量	kg	千克	国际千克原器的质量
电流	A	安 [培]	若真空中相距1米的两无限长，而圆截面可忽略的平行通电直导线之间产生的力在每米长度上等于 2×10^{-7} 牛顿，则此时的电流大小为1A
热力学温度	K	开 [尔文]	水的三相点的温度为 273.16K，1K等于水三相点温度的1/273.16，温度间隔单位也相同
物质的量	mol	摩 [尔]	是一系统的物质的量，该系统中所包含的基本微粒（原子、分子、离子、电子及其他粒子，或这些粒子的特定组合）数与0.012 kg碳12的原子个数相等
发光强度	cd	坎 [德拉]	一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 540×10^{12} Hz的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 $(1/683) \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$