

Basics of Radar Countermeasures Engineering

雷达对抗工程基础

魏 刚 主 审

杨 超 主 编

电子科技大学出版社

《雷达对抗工程基础》编委会

主 审 魏 刚

副主审 秦 航 裴晓黎

技 校 朱 明 闫 灵

主 编 杨 超

副主编 苗秀梅 邹时禧

王 辉 王世涛

编 者 牟能文 巩 强 游志军

刘重阳 田增彬 吴雪峰

李 明 练学辉 刘国亮

段国文 徐 立 蒋卫锋

张 骥 陆 阳 宋 昕

俞国庆

图书在版编目(CIP)数据

雷达对抗工程基础 / 魏刚主审, 杨超主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2006.5

ISBN 7 - 81114 - 111 - 6

.雷... . 魏... 杨... . 雷达对抗—雷达工程 . TN974

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 041116 号

内容提要

本书介绍了雷达对抗工程中常用的基本概念、经验公式及数据,并尽量用图解的方式阐述了某些分机、分系统和系统的基本原理。本书共分八章,第一章主要介绍了雷达对抗常用的基础知识;第二至五章介绍了天线、微波器件和接收机和数据总线的原理和特性;第六章从雷达对抗的角度介绍了雷达的基本原理和典型的雷达;第七章以雷达信号侦察为主线,主要介绍了雷达对抗信号分选的基本原理和方法;第八章基于雷达方程讨论了有关雷达干扰的问题。

雷达对抗工程基础

魏 刚 主 审

杨 超 主 编

出 版: 电子科技大学出版社(成都市建设北路二段四号)

责任编辑: 杜 倩

发 行: 电子科技大学出版社

印 刷: 成都金龙印务有限责任公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张 16.375 字数 390 千字

版 次: 2006年5月第一版

印 次: 2006年5月第一次印刷

书 号: ISBN 7-81114-111-6 / TN·2

定 价: 28.00 元

版权所有 侵权必究

邮购本书请与本社发行科联系。电话:(028)83201495 邮编:610054。

本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换。

目 录

第一章 基础知识	1
1.1 物理单位与常数	1
1.1.1 长度与速度单位	1
1.1.2 面积、功率和能量单位	1
1.1.3 倍频程	2
1.1.4 光速	2
1.1.5 不同介质中的电磁波和声音传播速度	2
1.1.6 物理常数	2
1.1.7 十进制、二进制、十六进制转换	4
1.2 电子学基本公式	4
1.3 频谱	8
1.4 分贝	11
1.5 雷达视距	15
1.6 多普勒频移	17
1.7 信号调制	21
1.8 占空比	25
1.9 傅里叶变换与小波变换	26
1.9.1 傅里叶变换	26
1.9.2 小波变换	29
1.10 电场强度	33
1.11 功率密度	37
1.12 电压驻波比、反射系数、回波损耗与失配损耗	40
1.13 射频大气吸收与大气波导传播	43
1.14 雷达截面积	44
1.15 辐射控制	49
1.16 辐射危害	55
第二章 天 线	59
2.1 天线经验公式和数据	59
2.2 天线增益与方向性系数	60
2.3 天线方向图	67
2.4 天线极化	67

2.5	天线近场与远场	71
2.6	天线频率和相位效应	75
2.7	典型天线及特性	77
2.8	相控阵天线	85
2.9	罗特曼透镜天线阵	87
第三章 微波器件		90
3.1	同轴线与同轴连接器	90
3.1.1	同轴线	90
3.1.2	同轴连接器	92
3.2	矩形波导	95
3.2.1	标准矩形波导	96
3.2.2	双脊矩形波导	98
3.3	定向耦合器、功率分配器与功率合成器	100
3.3.1	定向耦合器	100
3.3.2	功率分配器	103
3.3.3	功率合成器	104
3.4	衰减器、滤波器与直流阻隔器	105
3.4.1	衰减器	105
3.4.2	滤波器	106
3.4.3	直流阻隔器	107
3.5	终端负载与等效负载	108
3.5.1	终端负载	108
3.5.2	等效负载	109
3.6	环路器与双工器	109
3.7	混频器与鉴频器	111
3.8	检波器	113
3.9	微波测量经验方法	115
第四章 接收机		117
4.1	接收机灵敏度	117
4.2	接收机信噪比	118
4.3	接收机最大探测距离	120
4.4	接收机噪声功率	120
4.5	接收机噪声带宽	121
4.6	接收机带宽经验公式	122
4.7	接收机噪声系数	123
4.8	前置放大器输入噪声的影响	124
4.9	接收通道对系统灵敏度的影响	125

4.10 接收机类型与特性	127
4.11 接收机测试	132
第五章 数据传输总线	142
5.1 总线术语	143
5.2 RS-232 接口	146
5.2.1 通信标准	146
5.2.2 电气特性	148
5.2.3 机械特性	149
5.3 RS-422 接口	150
5.3.1 电气特性	150
5.3.2 环境限制	151
5.3.2 互连电缆指南	151
5.3.4 与其他接口的兼容性	152
5.4 RS-485 接口	152
5.4.1 电气特性	152
5.4.2 通用系统结构	152
5.4.3 接地电路	153
5.4.4 与 RS-422-A 的比较	153
5.5 IEEE-488 接口总线	154
5.6 MIL-STD-1553 总线	157
5.6.1 总线组成	158
5.6.2 数据编码	158
5.6.3 比特传输率	159
5.6.4 字格式	159
5.6.5 指令字	159
5.6.6 数据字	160
5.6.7 状态字	160
5.6.8 信息传递	160
5.6.9 MIL-STD-1553 总线与 MIL-STD-1773 总线的区别	161
第六章 雷 达	162
6.1 雷达的基本原理	162
6.2 雷达接收机灵敏度及探测距离	163
6.3 雷达探测距离及分辨率	164
6.4 雷达脉冲的基本特征	167
6.4.1 频率	167
6.4.2 脉冲宽度	167
6.4.3 脉冲重复频率	167

6.5	雷达信号的调制	168
6.5.1	脉冲调制	169
6.5.2	脉冲压缩调制	169
6.6	雷达波束扫描	172
6.7	几种典型雷达	177
6.7.1	连续波雷达与脉冲多普勒雷达	177
6.7.2	动目标指示雷达	179
6.7.3	合成孔径雷达	181
6.7.3	低截获概率雷达	183
6.7.4	典型雷达显示器	185
第七章	雷达侦察	188
7.1	信号环境	188
7.2	雷达信号截获	190
7.3	雷达信号主要参数及测量	192
7.4	雷达信号分选与处理	197
7.5	电子对抗接收机侦察距离	203
第八章	雷达干扰	212
8.1	雷达方程	215
8.1.1	单基地雷达的双程雷达方程	215
8.1.2	另一种形式的单基地双程雷达方程	222
8.1.3	收发分置雷达的双程雷达方程	223
8.2	恒功率干扰的干信比	225
8.2.1	对单基地雷达和收发分置雷达自卫干扰的干信比	226
8.3	恒增益干扰的干信比	235
8.3.1	对单基地雷达恒增益自卫干扰的干信比	237
8.3.2	对收发分置雷达恒增益自卫干扰的干信比	239
8.4	烧穿距离与交叉距离	240
8.4.1	单基地雷达的烧穿距离与交叉距离	242
8.4.2	收发分置雷达的烧穿距离与交叉距离	243
8.5	雷达有源干扰技术	245
8.5.1	噪声干扰	245
8.5.2	雷达诱饵	250
8.5.3	干扰技术的发展趋势	251
参考文献	252

前 言

本书从工程实际出发，介绍了雷达对抗工程中常用的基本概念、经验公式及数据。给出了某些分机、分系统和系统性能的评估公式、方法和测试技巧。书中给出了大量的实例和图表，以期读者直观、便捷地理解雷达对抗的基本原理和掌握解决某些工程问题的经验方法。希望本书对从事电子对抗行业的军代表和工程技术人员有一定的参考价值。

本书在编写和出版过程中得到了海装电子部、海装重庆局和中电科技集团第二十九研究所的首长、领导和同志们的关心、指导和鼓励，在此表示衷心的感谢。

由于我们的专业技术水平有限，书中难免存在笔误乃至错误之处，敬请批评指正。

编 者

2006年1月

第一章 基础知识

本章主要介绍雷达对抗工程中常用的物理单位、常数、公式、术语、概念等基础知识。

1.1 物理单位与常数

1.1.1 长度与速度单位

表 1-1-1 列出了雷达对抗工程中常用的长度和速度单位及单位之间的换算。

表 1-1-1 长度和速度单位及单位之间的换算表

长度单位	速度单位
1 in (英寸)=2.54 cm (厘米)	1 ft/s (英尺/秒) 0.59 kn (节)
1 ft (英尺)=30.48 cm (厘米)	1.1 km/h (千米/小时)
1 yd (码) 0.9144 m (米)	0.68 sm/h (法定英里/小时)
1 m (米) 39.37 in (英寸)	1000 ft/s (英尺/秒) 600 kn (节)
1 km (千米) 0.54 n mile (海里)	1 km/h (千米/小时) 0.54 kn (节)
0.62 sm (法定英里)	0.91 ft/s (英尺/秒)
1093.6 yd (码)	0.62 sm/h (法定英里/小时)
3280.8 ft (英尺)	1 mile/h (英里/小时) 0.87 节
1 mile(英里)=1609.344m(米)	1.47 ft/s (英尺/秒)
1 sm(法定英里)≅0.87n mile (海里)	1.61 km/h (千米/小时)
≅1.61 km (千米)	1 kn (节) 1.15 sm/h (法定英里/小时)
=1760 yd (码)	0.515 m/s (米/秒)
=5280 ft (英尺)	1.69 ft/s (英尺/秒)
1 n mile (海里) 1.15 sm (法定英里)	1.85 km/h (千米/小时)
1.825 km (千米)	1 kn (节) = 1 n mile/h (海里/小时)
2025 yd (码)	
6076 ft (英尺)	

1.1.1.2 面积、功率和能量单位

表 1-1-2 列出了雷达对抗工程中常用的面积、功率和能量单位及单位之间的换算。

表 1-1-2 面积、功率和能量单位及单位之间的换算表

功率和能量单位	面积单位
1 hp (马力) = 33000 ft·lb/m (英尺·磅/分钟) = 550 ft·lb/s (英尺·磅/秒) 746 W (瓦特) \cong 2545 Btu/h	1 m ² (平方米) 10.76 ft ² (平方英尺) 1 in ² (平方英寸) 645 mm ² (平方毫米) 1 ft ² (平方英尺) = 0.0929030 m ² (平方米)
1 Btu (英热单位) 1055 J (焦耳) 778 ft·lb (英尺·磅) 0.293 W·hr (瓦特·小时)	
1kW·h (千瓦·小时) 3.6 × 10 ⁶ J (焦耳)	

1.1.1.3 倍频程

“ N ”个倍频为起始频率 ~ 起始频率 $\times 2^N$ 。例如：2 ~ 4GHz 为一个倍频，2 ~ 8GHz 为二个倍频，2 ~ 16GHz 为三个倍频。

1.1.1.4 光速 (见表 1-1-3)

表 1-1-3 光速实际值、工程值及其单位

实际值	工程值	单位
2.9979246×10^8	3×10^8	m/s (米/秒)
299.79	300	m/ μ s (米/微秒)
3.27857×10^8	3.28×10^8	yd/s (码/秒)
5.8275×10^8	5.8×10^8	n mile / h (海里/小时)
1.61875×10^5	1.62×10^5	n mile/s (海里/秒)
9.8357105×10^8	1×10^9	ft/s (英尺/秒)
9.8357105×10^2	1×10^3	ft/ μ s (英尺/微秒)

1.1.1.5 不同介质中的电磁波和声音传播速度

下列公式定义了电磁波通过物质 (如电缆) 的速度：

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

式中 μ_r 为相对磁导率， ϵ_r 为相对介电常数。在典型电缆中电磁波传播速度大概只有光在真空中传播速度的 65% ~ 90%。

表 1-1-4 列出了声音在不同介质中传播的速度。

估计闪光爆炸处距离的经验法则：用 3 除以从看到闪光到听到声音之间的时间秒数值（单位：km），用 0.2 乘以从看到闪光到听到声音之间的时间秒数值（单位：nm）。

1.1.1.6 物理常数

表 1-1-5 列出了雷达对抗工程中常用的物理常数、单位和符号。

表 1-1-4 声音在不同介质中传播的速度

介质	速度 ft/s (英尺/秒)	介质	速度 ft/s (英尺/秒)
空气	1100	淡水	4700
海水	4900	玻璃	14800
钢材	20000		

表 1-1-5 常用物理常数、单位和符号

物理常数	常数值	SI 单位	符号
阿伏加德罗常数	6.0221367×10^{23}	mol^{-1}	N_A
波尔磁子	$9.2740154 \times 10^{-24}$	$\text{J} \cdot \text{T}^{-1}$	μ_B
玻尔兹曼常数	1.380658×10^{-23}	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	k
电子电荷	$1.60217733 \times 10^{19}$	C	$-e$
电子荷质比	$-1.75881962 \times 10^{11}$	$\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$	$-e/m_e$
电子静止质量	$9.1093897 \times 10^{-31}$	kg	m_e
法拉第常数	9.6485309×10^4	$\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$	F
重力加速度	9.80665 32.174	m/s^2 ft/s^2	g
约瑟夫森频率电压比	4.8359767×10^{14}	$\text{Hz} \cdot \text{V}^{-1}$	$2e/hg$
磁通量	$2.06783461 \times 10^{-15}$	Wb	ϕ
摩尔气体常数	8.314510	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	R
自然对数基数	2.71828		
万有引力常数	6.67259×10^{-11}	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	G
真空磁导率	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m	μ_0
真空介电常数	$8.8541878 \times 10^{-12}$	F/m	ϵ_0
π	3.141592654		π
普朗克常数	6.62659×10^{-34}	$\text{J} \cdot \text{s}$	h
普朗克常数/ 2π	$1.05457266 \times 10^{-34}$	$\text{J} \cdot \text{s}$	$h(=h/2\pi)$
循环量子	$3.63694807 \times 10^{-4}$	$\text{J} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$	$h/2m_e$
地球半径(赤道)	6.378×10^6	m	
	3963	mile	
里德伯常数	1.0973731534×10^7	m^{-1}	R_X

光速	2.9979246×10^8	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	c
音速	331.4	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
理想气体的标准容量	22.41410×10^{-3}	$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$	V_m
史蒂芬-玻兹曼常数	5.67051×10^{-8}	$\text{W} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2}$	

1.1.7 十进制、二进制、十六进制转换

表 1-1-6 列出了十进制、二进制、十六进制数转换关系。

表 1-1-6 十进制、二进制、十六进制数转换表

十进制	二进制	十六进制	十进制	二进制	十六进制	十进制	二进制	十六进制
1	00001	01h	11	01011	0Bh	21	10101	15h
2	00010	02h	12	01100	0Ch	22	10110	16h
3	00011	03h	13	01101	0Dh	23	10111	17h
4	00100	04h	14	01110	0Eh	24	11000	18h
5	00101	05h	15	01111	0Fh	25	11001	19h
6	00110	06h	16	10000	10h	26	11010	1Ah
7	00111	07h	17	10001	11h	27	11011	1Bh
8	01000	08h	18	10010	12h	28	11100	1Ch
9	01001	09h	19	10011	13h	29	11101	1Dh
10	01010	0Ah	20	10100	14h	30	11110	1Eh

1.2 电子学基本公式

(1) 直流电路的欧姆定律

$$V = IR = \frac{P}{I} = \sqrt{PR}$$

$$P = I^2 R = IV = \frac{V^2}{R}$$

(2) 交流电路的欧姆定律和功率因数

欧姆定律为：

$$V = IZ = \frac{P}{I \cos \varphi} = \sqrt{\frac{PZ}{\cos \varphi}}$$

$$P = I^2 Z \cos \theta = I V \cos \theta = \frac{V^2 \cos \theta}{Z}$$

式中， θ 是在电流和电压之间的超前角或滞后角。

功率因数为：

$$PF = \frac{P}{IV} = \frac{R}{Z} = \cos \theta$$

式中， P 为有效功率，单位为 W； IV 为视在功率，单位为 VA（伏安）。

注：有效功率是电阻功率，等于水的等效热效应。

(3) 电压、电流相位经验法则

电感中电压超前于电流；电容中电流超前于电压。

(4) 串联总电阻公式

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

(5) 并联总电阻公式

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots}$$

(6) 共振频率公式

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad \text{或} \quad f = \frac{159.2}{\sqrt{LC}}$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C}, \quad \text{或} \quad L = \frac{25330}{f^2 C}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L}, \quad \text{或} \quad C = \frac{25330}{f^2 L}$$

式中， f 的单位为 kHz， L 和 C 的单位分别为 μH （微亨）和 μF （微法）。

(7) 电导公式

$$G = \frac{1}{R} \quad (\text{直流电路})$$

$$G = \frac{1}{R^2 + X^2} \quad (\text{交流电路})$$

(8) 电抗公式

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

$$X_L = 2\pi f L \quad L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

(9) 阻抗公式

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (\text{串联电路})$$

$$Z = \frac{RX}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (R \text{ 和 } X \text{ 并联})$$






(10) Q 值公式

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}$$

(11) 电感、电阻和电容频响特性

表 1-2-1 列出了电感、电阻和电容频响特性。

表 1-2-1 电感、电阻和电容频响特性表

		电感器* 	电容器* 	电阻器 
—	直流	导通	阻隔	衰减
	低频交流	衰减*	衰减*	衰减
	高频交流	阻隔	导通	衰减

* 衰减随每一种器件和频率的不同而不同。

(12) 正弦电压和电流的平均值、有效值和峰值 (见图 1-2-1)

有效值 (均方根值): $0.707 \times$ 峰值, 半周期平均值: $0.637 \times$ 峰值

峰值: $1.414 \times$ 有效值, 有效值: $1.11 \times$ 平均值

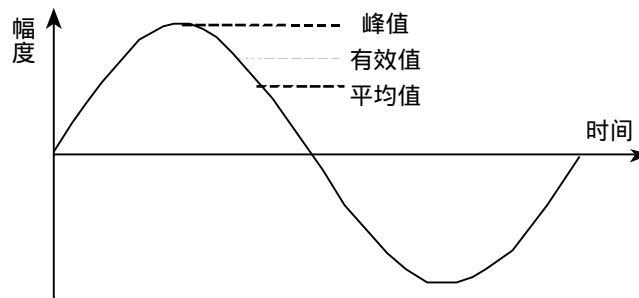


图 1-2-1 正弦电压和电流的平均值、有效值和峰值

(13) 三相交流电配置

舰船上的电源通常使用三角形配置, 而商用和飞机上的电源通常使用 Y 字形配置, 每

相之间有 120° 相差 (见图 1-2-2), 配电盘接线色码及用途见表 1-2-2。

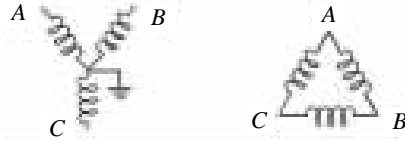


图 1-2-2 三相交流电 Y 字形配置和三角形配置

表 1-2-2 配电盘接线色码及用途

配电盘接线色码	用途
红色	火线
白色	回路
黑色	地线

(14) 元件色标

电子设备中所用大量的固定电阻器、陶瓷电容器和管型保险丝, 由于尺寸较小以及造型所限, 不易在其上直接注明元件参量的数值, 因此一般都采用色码 (色标) 制, 即在元件上记上不同的色标, 按色标的排列表示出元件参量数值。

表 1-2-3 列出了固定电阻器四带色标, 表 1-2-4 列出了陶瓷电容器色标, 表 1-2-5 列出了限流保险丝色标。

表 1-2-3 固定电阻器四带色标表

色环 颜色	第一色标 (第一位数)	第二色标 (第二位数)	第三色标 (倍乘数)	第四色标 (误差)
黑	0	0	$\times 10^0$	
棕	1	1	$\times 10^1$	
红	2	2	$\times 10^2$	
橙	3	3	$\times 10^3$	
黄	4	4	$\times 10^4$	
绿	5	5	$\times 10^5$	
蓝	6	6	$\times 10^6$	
紫	7	7	$\times 10^7$	
灰	8	8	$\times 10^8$	
白	9	9	$\times 10^9$	
金			$\times 10^{-1}$	$\pm 5\%$
银			$\times 10^{-2}$	$\pm 10\%$

本色				$\pm 20\%$
----	--	--	--	------------

例如：电阻器色环为蓝-红-金-金时，其电阻为 6.2Ω ，误差为 $\pm 5\%$ 。

陶瓷电容器色标包括一个“端色”，表示温度系数的大小正负，说明温度变化 1 时电容值变化了兆分之几，符号“N”表示温度系数为负值，“P”表示温度系数为正值。此外有四个色斑，依次代表第一位和第二位有效数值、乘倍数和误差。

表 1-2-4 陶瓷电容器色标表

颜色	端色 (温度系数)	第一色斑 (第一位数)	第二色斑 (第二位数)	第三色斑 (倍乘数)	第四色斑(误差)	
					<10pF	>10pF
黑	NP0	0	0	$\times 10^0$	$\pm 2.0\text{pF}$	$\pm 20\%$
棕	N030	1	1	$\times 10^1$	$\pm 0.1\text{pF}$	$\pm 1\%$
红	N080	2	2	$\times 10^2$	-	$\pm 2\%$
橙	N150	3	3	$\times 10^3$	-	$\pm 2.5\%$
黄	N220	4	4	$\times 10^4$	-	-
绿	N330	5	5	-	$\pm 0.5\text{pF}$	$\pm 5\%$
蓝	N470	6	6	-	-	-
紫	N750	7	7	-	-	-
灰	P030	8	8	$\times 10^{-2}$	$\pm 0.25\text{pF}$	-
白	P100	9	9	$\times 10^{-1}$	$\pm 1.0\text{pF}$	$\pm 10\%$

表 1-2-5 限流保险丝色标表

颜色	定额(A)	颜色	定额(A)
绿与黄	0.01	绿	0.750
红与蓝	0.015	蓝	1.0
尼罗水绿	0.025	浅蓝	1.5
橙红	0.050	紫	2.0
黑	0.060	黄与紫	2.5
灰	0.100	白	3.0
红	0.150	黑与白	5.0
棕	0.250	橙	10.0
黄	0.500		

1.3 频谱

图 1-3-1 为电磁辐射频谱及其一些常用或已知的用途范围。图 1-3-2 为微波谱常用范围。图 1-3-3 为经常涉及到的频段名称。

频率 (f) 与波长 (λ) 之间不同单位之间的相互转换如下：

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (c \text{ 为光速})$$

$$\lambda_m = \frac{3 \times 10^8}{f_{\text{Hz}}} = \frac{3 \times 10^5}{f_{\text{kHz}}} = \frac{300}{f_{\text{MHz}}} = \frac{0.3}{f_{\text{GHz}}}$$

$$f_{\text{Hz}} = \frac{3 \times 10^8}{\lambda_m} ; f_{\text{kHz}} = \frac{3 \times 10^5}{\lambda_m} ; f_{\text{MHz}} = \frac{300}{\lambda_m} ; f_{\text{GHz}} = \frac{0.3}{\lambda_m}$$

频率 (f) 与波长 (λ) 之间的不同单位相互转换近似计算如下：

公制情况

$$\lambda_{\text{cm}} = \frac{30}{f_{\text{GHz}}}$$

例如：频率为 10GHz 时， $\lambda_{\text{cm}} = 30/10 = 3\text{cm}$ 。

英制情况

$$\lambda_{\text{ft}} = \frac{1}{f_{\text{GHz}}}$$

例如：频率为 10GHz 时， $\lambda_{\text{ft}} = 1/10 = 0.1\text{ft}$ 。