

# 微波频率源 及其测量

全国雷达军标委 组编  
黄河机器制造厂  
王彦斌 主编



陕西科学技术出版社

30551405

TN95-5  
02

# 微波频率源及其测量

全国雷达军标委 组编  
黄河机器制造厂

王彦斌 主编

HK39108



C0160933

陕西科学技术出版社

## 内 容 提 要

本书收入了在多年微波频率源科研和教学工作中具有丰富理论和实践经验的科技工作者论文 27 篇。其中论证不同雷达体制的整机性能与频率稳定度关系 4 篇；频率源的频率稳定度定义、表征和测试方法 6 篇；频率合成器相位噪声性能的理论分析和研制实践 5 篇；频率源主要技术指标分析及国内外发展水平综述 4 篇；频综的跳频控制转换时间及测量 4 篇；频率源的电磁兼容性 3 篇；国际微波测量介绍 1 篇；新编国标“雷达频率源主要性能测试方法”和测量设备一览表等内容亦同时附于书后。

本书对微波频率源在设计、制造和测量等方面的理论和实践均作了较详细深入的介绍，内容新颖，实用性强，可供从事微波电子线路、微波测量、雷达及通讯工程等方面的科技人员参考，也可作为院校师生的参考资料。

## 文 集 编 辑 委 员 会

主任 毛士兴 耿金宗

编委 杜武林 张有正 汤世贤 秦士 叶德培 干华雷 王彦斌

主编 王彦斌

### 微波频率源及其测量

全国雷达军标委

黄河机器制造厂 组编

王彦斌 主编

陕西科学技术出版社出版发行

(西安北大街 131 号)

经销 西安电子科技大学印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 20 印张 46 万字

1991 年 3 月第 1 版 1991 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1-2200

ISBN 7-5369-0871-7 / TN·7

定 价: 7.90 元

## 序

早期的军用雷达,发射频率、本振频率和脉冲重复频率精度要求不高,且无严格关系。但是随着军用雷达功能不断拓宽,性能日益提高,频率源(信号产生)和时间基准至少在功能上正演变为雷达系统中一个关键的独立分系统,其指标高低直接影响多种现代雷达的性能优劣。诸如动目标检测、脉冲多卜勒、脉冲压缩、多卜勒测速和合成孔径等现代雷达都要提取和利用回波的频率、相位信息。

就频率源而言,究竟需要几项指标表征其性能,使之同雷达系统相适应;对这些指标的解释能否一致,以及这些指标的测试方法和手段是否科学实用等等,始终是国内外同行精心探求的问题。正确地解决这些问题必然促进频率源和雷达系统的发展,否则研制和检验工作仍处于盲目紊乱的困境。

为此,我们根据上级指示,组织人员编制了国家军用标准《雷达频率源主要性能测试方法》。在军标的编制过程中,主办单位为集思广益、充分掌握国内外动态水平,使标准基础牢靠,符合国情和技术发展方向,特邀请从事频率源工作的同志,进行了专题技术交流,会议收到显著效果,也为军标编制方法提供了有益的新尝试。

这本论文集就是在交流会的基础上,经过充实、整理,汇编而成。论文作者中不少是在频率源方面造诣颇深的专家,更有经验丰富的工程设计师。论文集涉及多方面的内容:频率源分类、技术指标与国内外发展水平;频率稳定度的理论分析与测试方法;频率稳定度与雷达系统性能的关系;频综器的相噪性能与改进途径;频率转换时间的分析与测试方法;电磁兼容,以及国际微波测量发展动态。总之,论文集是一本包括微波频率源设计制造、理论分析和性能测试多方面内容的一本专著,对从事设计、研制和测试的广大科技工作者很有实用价值,对学习标准内容也不失为一本好参考书。

借论文集出版之际,谨向论文作者、文集编辑、标准主编单位,以及关心支持雷达军标工作的同志们表示诚挚的谢意。

全国军用雷达标准化技术委员会秘书长 王德昆

1990年8月6日

## 前 言

纵观近几十年来的电子领域，微波频率源的发展迅速而卓有成效。它不仅在雷达中占有重要位置，而且也是现代通讯，无线电导航和电子测量设备不可缺少的关键组成部分。

微波频率源的发展，既要解决各种理论和技术问题，同时还必须解决测试手段和测量方法问题。为此，总参四部和全国雷达军标委向黄河机器制造厂下达了“雷达频率源主要性能测试方法”的编制任务。在军标编写过程中，遇到的最突出的问题，就是频率源的频率稳定度。它不仅涉及到随机过程的概率统计理论和噪声理论，也涉及到很多系统和电路的技术问题，以及当代先进的计量手段和测试设备问题。然而遗憾的是，对这样一个涉及面广综合性极强的“边缘”学科，人们的认识既不够充分也不很统一，急待于从事和关心这项工作的专家学者共同努力加以解决。鉴于此，我们在上级领导的支持下，结合军标的制定组织召开了由国内长期从事微波频率源研制和教学工作的专家、教授、工程技术人员参加的学术讨论会，就频率源所涉及的有关问题认真地交换了意见，同时也交流了多年来我国在频率源研制方面的经验。本书就是在讨论会的基础上，经过对论文内容的修改扩充，加工提高，整理汇编而成。

本书以频率稳定度为核心，以频率合成器为重点，深入地论述了频率源在设计、制造和测量等方面大家共同关心的理论和实践问题。其主要内容包括以下几个方面：

- 频率稳定度的定义、表征和测量方法；
- 频率稳定度对雷达整机性能的影响；
- 频率合成器的相噪性能分析与研制实践；
- 频率合成器的跳频控制和频率转换时间的测量；
- 频率源的主要性能指标与国内外发展水平；
- 频率源的电磁兼容性设计；

书中各篇文章既有深入浅出的理论分析，又有研制实践中的经验总结；既有其内容的独立性和完整性，同时又相互补充组成一个有机的整体。可以说，该书是一本内容新颖、涉及面广、又有较强的工程实用性的科技专著。

本书的出版得到总参四部领导和全国雷达军标委的亲切关怀和大力支持，雷达军标委秘书长王德昆同志还为本书作序。

论文作者在百忙中，查阅资料，推导论证，分析计算，归纳抄写，为本书出版付出了辛勤的劳动。

陕西省科技出版社的领导和工作人员为本书的出版做了大量的工作。

国营黄河机器制造厂的各级领导也十分关心这一工作。该厂标准处具体组织了该书

的编写并为本书编写提供了种种方便条件。孙碧华、胡英、蔡志明等同志在书稿抄写、插图绘制和文字校对等方面做了大量细致的工作。

借本书出版之机，谨向他们表示衷心的感谢。

因水平所限，加之时间仓促，不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1990年7月

# 目 录

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 综论现代雷达的频率稳定度问题       |     |
| ——航空航天部二院二〇三所 郭衍莹    | 1   |
| 频率源的稳定度对雷达性能的影响      |     |
| ——清华大学 应启珩           | 21  |
| PD 雷达频率源的短期稳定度要求与计算  |     |
| ——南京电子技术研究所 张少时      | 28  |
| MTI 雷达改善因子与频率源短稳的关系  |     |
| ——电子科技大学(成都) 朱学勇 张有正 | 37  |
| 频率稳定度的定义及测量          |     |
| ——电子科技大学(成都) 彭启琮 张有正 | 46  |
| 频率稳定度及相位噪声的频域测量      |     |
| ——北京理工大学 汤世贤         | 57  |
| 频率稳定度的测试方法与精度分析      |     |
| ——航空航天部二院二〇三所 王志田    | 66  |
| 频率稳定度的时域及频域测量        |     |
| ——机电部第二十研究所 胡寿曾      | 81  |
| 用计数器测量频率源的短期频率稳定度    |     |
| ——电子科技大学(成都) 张有正 彭启琮 | 91  |
| 雷达频率源相噪性能表征          |     |
| ——清华大学 秦士            | 100 |
| 雷达频率源分类及性能指标         |     |
| ——黄河机器制造厂 王彦斌        | 103 |
| 概论微波频率合成器的发展水平       |     |
| ——西安电子科技大学 章荣庆 叶厚裕   | 122 |
| 当前雷达频率源的发展概况         |     |
| ——航空航天部第六〇七研究所 孙广善   | 136 |
| 电调谐振荡器综述             |     |
| ——黄河机器制造厂 王彦斌        | 144 |
| 频率合成器的相位噪声           |     |
| ——西安电子科技大学 杜武林       | 156 |
| 间接式雷达频率合成器的相位噪声分析与测量 |     |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| ——机电部第六〇七研究所 高树廷 .....       | 166 |
| 锁相环路对振荡器相位噪声的最佳过滤            |     |
| ——西安电子科技大学 张厥盛 .....         | 175 |
| 频率综合系统中相位噪声的分析及应用            |     |
| ——航空航天部六〇七研究所 孙广善 .....      | 186 |
| 参考源对频率合成器性能的影响               |     |
| ——机电部第十研究所 陈溪明 许昭菊 .....     | 192 |
| 频率合成器的频率转换时间及其测量             |     |
| ——清华大学 秦士 .....              | 202 |
| 锁相式频率合成器的快速捕捉及跳频时间分析         |     |
| ——机电部第二〇六研究所 高树廷 .....       | 207 |
| 频率合成器变频时间分析与测量               |     |
| ——船舶总公司第七二四研究所 王文斌 .....     | 216 |
| 频率切换速度的测量                    |     |
| ——航空航天部二院二〇三所 刘忠英 李成福 .....  | 221 |
| 雷达频率源的电磁兼容                   |     |
| ——机电部第二十研究所 续魁汉 .....        | 226 |
| 微波频率源的电磁兼容性设计                |     |
| ——西安电子科技大学 邱扬 .....          | 232 |
| 谈电磁兼容工程的发展动态                 |     |
| ——国防科学技术大学 柳力昌 .....         | 243 |
| 当前国际微波测量发展动态                 |     |
| ——航空航天部无线电计量测试研究所 叶德培 .....  | 247 |
| 附录 A                         |     |
| GJB 雷达频率源主要性能测试方法(报批稿) ..... | 254 |
| 附录 B                         |     |
| 微波频率源测量设备一览表 .....           | 275 |
| 附录 C                         |     |
| 常用单位及换算 .....                | 282 |
| 附录 D                         |     |
| 列线图 .....                    | 290 |
| 附录 E                         |     |
| 全国高稳晶振比对测试结果一览表(1~4 届) ..... | 298 |

# 综论现代雷达的频率稳定度问题

航空航天部二院二〇三所 郭衍莹

## 一、引言

频率稳定度是现代雷达(如多普勒测速、脉冲压缩、动目标显示、脉冲多普勒、合成孔径、射电天文、导航定位等雷达)的一项关键或重要指标。它也是当前这一领域中广大科技人员共同关心的一个重要技术问题。众所周知,现代雷达(大多数为脉冲体制,少数为连续波体制)尽管五花八门、种类繁多,但多数采用相干体制,利用相位或频率信息而不是按传统方式那样利用幅度信息来完成系统的主要功能;或者虽不直接利用相位、频率信息,但必需在振荡源相位或频率高度稳定前提下才能完成其系统功能。例如多普勒测速雷达利用多普勒频移得到速度数据;动目标显示雷达利用多普勒效应在时域上从背景干扰中提取动目标信息;脉冲多普勒利用多普勒效应在频域上滤除地物和气象杂波,提取动目标信息;脉冲压缩雷达利用器件稳定的色散特性得到 Chirp 波或脉冲压缩波;射电天文雷达利用相位干涉原理得到天体角度数据或基线数据,等等。这样,如果雷达本身振荡源就存在着频率起伏或相位起伏(或者说振荡信号存在调频或相位噪声),那么这种起伏或者噪声就会与有用的频率或相位信息相混淆,从而大大降低雷达系统的实际性能。随着近年来现代雷达性能和精度迅速提高(例如,据文献报导,国外靶场测控雷达测速精度要求优于  $0.1\text{m/s}$ ;低空雷达改善因子要求在  $50\text{dB}$  以上;数字通信误码率要求小于  $10^{-5}$ ;等等)频率稳定度的重要性也日益突出。

所谓频率稳定度问题,归纳起来可包括下列几方面内容:

1. 各种现代雷达频率稳定度表征方法和指标的定义;
2. 频率起伏或相位噪声对雷达系统性能的影响,或者反过来说,根据给定的雷达系统性能容差来确定对振荡源起伏特性的要求;
3. 现代雷达频率稳定度指标的检测方法;
4. 如何改进和控制现代雷达的频率稳定度。

需要指出,当今现代雷达的频率稳定度不仅是广大科技人员(包括总体、电路、计量测试几方面人员)共同关心的一个问题,而且也是从定义、术语、概念到表征方法等都存在着混乱,以致众说纷云,使很多人莫衷一是的问题。本文是作者在多年实践工作基础上结合上面四个问题所进行的综述,并提出了解决这些问题的方案或思路。

## 二、现代雷达频率稳定度的表征方法和指标的定义

这是频率稳定度问题中应首先解决的问题,否则搞总体、电路和计量测试三方面人员之间就没有共同语言。遗憾的是这个问题至今并没有很好解决。如在一些文献和资料上,对频率稳定度的表征和指标,就各有好的命名方法,且各有各的理解。有关例子不胜枚举。下面举两个有代表性的例子:

1. 脉冲压缩雷达对 Chirp 波(假定为线性调频波)内的频率起伏应有一定的限制,如图 1-1 所示。因为在 Chirp 波脉宽  $\tau$  内任意起伏  $\Delta f$  都会在后来的脉冲压缩过程中产生虚假回波(旁瓣)。因此总体设计人员提出了指标:  $\frac{\Delta f}{f_0} / \tau$ , 意谓在  $\tau$  内起伏不要超过  $\Delta f$ (均

方根值)。若不加详细阐述,计量测试人员将误解为这是阿仑方差  $\sigma_y(\tau) < \frac{\Delta f}{f_0}$ (实际上二者可能差别很大)。

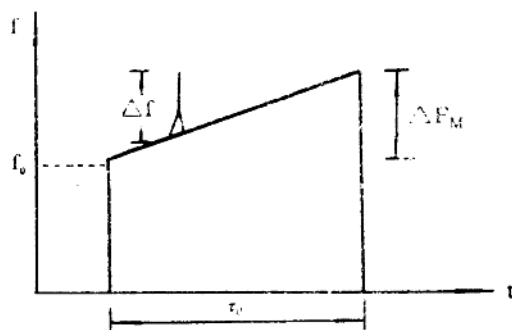


图 1-1 Chirp 内频率起伏的限制

2. 脉冲多普勒雷达主要指标之一——杂波下能能见度(SCV)是指每个多普勒滤波器内被接收信号的相位噪声—信号比(再乘以可见度因子)。而计量测试人员则常误解为这是对振荡源相位噪声谱密度的要求。其实二者往往有很大差别:首先由于混叠效应(因脉冲雷达的重复频率常远小于相位噪声谱的上限截频而产生,下节将进一步说明),被接收信号(视频脉冲)的相位噪声谱和脉冲调制前振荡

信号的相位噪声是不同的。其次,由于雷达系统的相干接收关系(无论是全相干还是准相干),进入多普勒滤波器的视频脉冲相位噪声谱与发射脉冲信号相位噪声谱也是不同的(也将在下一节进一步说明)。忽略这两点可能导致量值上的很大差别。

作者认为,产生上述情况的原因是:其一,雷达对频率稳定度的要求如何表征为能够计量或者测试的指标是涉及总体、电路和测试三方面专业的问题。但是计量测试人员目前广泛采用的频率稳定度表征方法——阿仑方差和相位噪声谱密度至今还没有完全被广大总体和电路设计人员所理解和接受。而广大计量测试人员对雷达又不熟悉。这就可能使大家对指标的提法和理解大相径庭。其二,现代雷达大多数为脉冲体制。众所周知,阿仑方差和相位噪声谱密度是针对连续波振荡信号而定义的。而现代脉冲雷达由于其占空比一般很小,重复频率又低(不满足采样定理,因而无法恢复原信号),用计量上的标准定义来直接表征它们不但概念含糊不清,甚至根本无法度量。因此国外脉冲雷达都不用阿仑方差来表征其频率稳定度,而是根据实际情况提出对振荡信号的要求。这就更需要计量测试人员弄清总体、电路设计人员所提指标的含义。综上所述,可见总体、电路

和计量测试三方面专业人员之间相互了解是极其必要的。另外,将几种主要雷达频率稳定度指标的定义、术语、表征方法和计算公式等加以规范化和标准化,是急待解决的问题。

需要指出,现代雷达的频率稳定度指标是与其信号处理方式密切相关的。典型的信号处理技术有多普勒信息解调、脉冲压缩、动目标显示、脉冲多普勒、合成孔径等等。这些雷达的频率稳定度表征方法和计算公式已汇集于表 1-1 中,供读者参考。表中所列公式都已在作者的著作<sup>[2]</sup>中加以论证,从表中可以看出,它们有的采用时域表征、有的采用频域表征。

但是,还应指出,现代雷达当前发展的一个重要趋势是采用各种先进的(因而也往往是复杂的)信号处理手段,以各种火控、制导、测量等地面战术雷达而言,为了更有效地对抗各种杂波(地、海、气象杂波),近年来大力发展和采用数字动目标检测技术(MTD)。MTD 的具体实施方案很多,例如用一次数字对消加数字 FFT;也有用特殊的三脉冲对消(如:  $a + b + c$ ,  $\frac{3}{2}(a - c)$ ,  $\frac{3}{4}(a - 2b + c)$ ;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为第 1、2、3 个脉冲回波的采样值),等等。如何表征这些雷达的频率稳定度指标?以及如何鉴定和测量这些指标?这个问题使总体和电路、测量三方面科技人员都感到大为困惑。

在上述情况下,作者认为雷达的频率稳定度指标应尽可能用频域表征。因为“相位噪声谱密度”,无论是定义还是测量,在今天已能为大家所理解或接受;而不象时域表征那样认识上混乱。这正如很多文献所认为的,频域表征较之时域表征更能反映事物的本质。现代雷达信号处理部分尽管千变万化,一般说来总可写出其传递函数表达式。例如,  $N$  次对消器有  $|H_N(f)| = (\sin n\pi f\tau)^N$  ( $\tau$  为延时);上述特种三脉冲对消器有:  $|H_1(f)| = 2\cos 2\pi f\tau + 1$ ;  $|H_2(f)| = 3\sin 2\pi f\tau$ ;  $|H_3(f)| = 3\sin^2 \pi f\tau$ , 等等。对于不能写成解析式的那些数字信号处理器(如 FFT 等),也必有明确的数字解。这样,对一般 MTD 雷达而言,其振荡源相位噪声谱密度  $S_{\phi}(\omega)$  与雷达的杂波下能见度 SCV 的关系可写成

$$S_{\phi}(\omega) \cdot 2(1 - \cos \omega t_d) \cdot \prod_{i=1}^k |H_i(\omega)|^2 \cdot B_d \leq \text{SCV} \cdot V_0 \quad (1)$$

上式与表 1-1 中脉冲多普勒雷达有关公式相对应。表中连乘号( $\prod$ )表示  $k$  个信号处理环

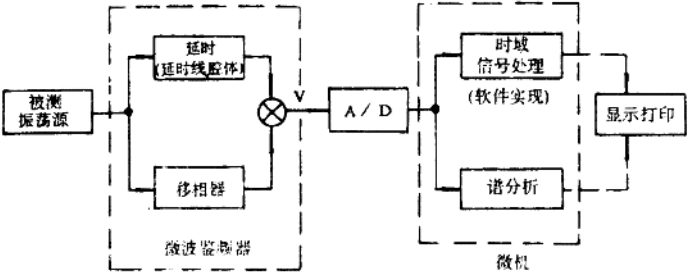


图 1-2 频率稳定度测试框图

表 1-1

现代雷达频率稳定度计算公式和经验数据

| 雷 达     | 受频率起伏影响的参数                            | 系统参数与频率稳定度关系                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 频率稳定度计算公式                                                                                            | 频率稳定度经验数据                              |
|---------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1 多普勒测速 | 速度 $v$                                | $\Delta v = \frac{C}{2} \left( \frac{\Delta f_n}{f_0} \right)$<br>(C: 光速)                                                                                                                                                                                                                                              | $\sigma_f^2 = 2\sigma^2(2, t_d, \tau)$<br>( $\tau$ : 测频时间)                                           | $10^{-10}$ 或更高                         |
| 2 脉冲压缩  | ① 距离 $S$<br>② 虚假回波 $0_{eff}/\sqrt{2}$ | $\Delta S = \frac{1}{2} c \Delta t_d = \frac{1}{2} \tau_d f_0 \left( \frac{\Delta f_n}{f_0} \right)$<br>$\bar{0}_{eff}^2 = \int_0^\infty 2S_p(\omega)(1 - \cos \omega t_d) \cdot \left[ 1 - \frac{\sin \frac{\omega \tau_d}{2}}{\frac{\omega \tau_d}{2}} \right]^2 df$<br>( $\tau_d$ : Chirp 波脉宽, $\Delta f$ : 线性调频频率) | $\sigma_f = \frac{\Delta t_d \Delta F_m}{\tau_d f_0}$<br>需用计算机模拟                                     | $10^{-6}$ 左右<br>$10^{-6} \sim 10^{-8}$ |
| 3 动目标显示 | 改善因子 $I$                              | ① 全相干时 $I = 20lg(1/2\pi\Delta t_d)$<br>② 准相干时 $I = 20lg(\sqrt{3}/2\pi\sigma_{df}\tau)$<br>( $\Delta f$ : 脉间频率起伏, $\tau$ : 脉宽)                                                                                                                                                                                          | $\Delta \phi^2 = 2T_p \sigma^2(2, t_d, T_p)$<br>$\sigma_{df} = \sqrt{3}/2\pi t$<br>( $T_p$ : 脉冲重复周期) | $10^{-8}$ 左右                           |
| 4 脉冲多普勒 | 杂波下能见度 SCV                            | $S_p(\omega) \cdot 2(1 - \cos \omega t_d) \cdot B_p \leq SCV \cdot V_0$<br>( $V_0$ : 可见度系数)                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                      | $10^{-8} \sim 10^{-10}$                |
| 5 合成孔径  | 天线方向图 $G(\theta)$ 等                   | $G(\theta) = \left  \sum_{n=1}^N e^{j(A_n \theta)} e^{j \frac{2\pi f_n}{N}} \right ^2$<br>( $\Delta \phi$ : 振荡源相位起伏, $a = \frac{2\pi f}{N}$ )<br>$L$ : 合成天线长度, $N$ : 振荡源数                                                                                                                                              | 需用计算机模拟                                                                                              | $10^{-8}$ 左右                           |

节串接；其他符号定义同表 1-1。如果雷达的频率稳定度指标一定要用时域表征，则总体工作者也应详细交待信号处理方式，以便电路设计和计量测试人员了解，并便于鉴定测试(如用图 1-2 的方法)。

### 三、关于雷达频率稳定度的几个重要概念

振荡信号频率起伏或相位噪声对雷达性能的影响，或者反过来说，根据给定的雷达性能的容差来确定对振荡源起伏特性的限制是频率稳定度问题中的核心问题。在讨论这个问题时，首先要特别强调下列几个重要概念：

1. 现代雷达大多采用相干体制，即发射机主振信号和接收机本振信号的相位(或频率)是相干的(全相干或准相干)。图 1-3 为全相干的原理图以及等效电路。由图 1-3(a)

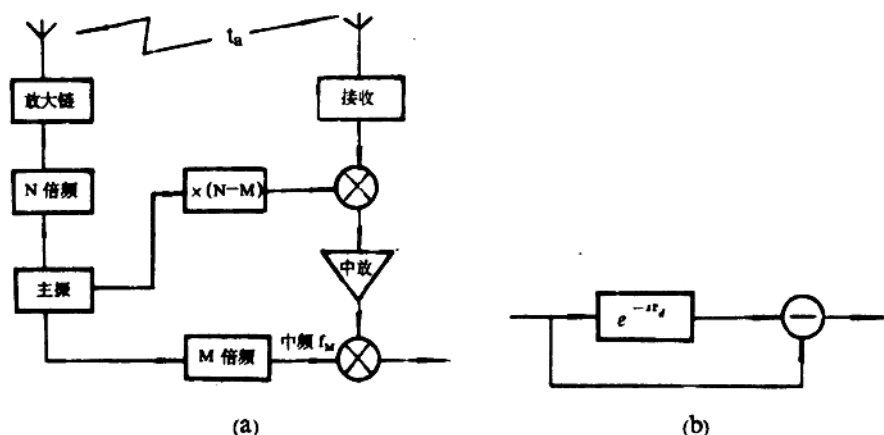


图 1-3 全相干雷达原理和等效电路

可见，发射信号经反射(或应答)、接收再与本振信号相干检波，能有效抵消掉一部分频率或相位起伏。若电波往返时间为  $t_d$ ，测量采样时间为  $\tau$ ，则对频率稳定度的要求可写成

$$S_0^2 = \frac{1}{\tau^2} \langle (\bar{f}_t - \bar{f}_{t+t_d})^2 \rangle \quad (2)$$

式中  $\bar{f}$  为  $\tau$  内频率平均值。符号  $\langle \rangle$  代表统计平均值。根据标准定义<sup>[1]</sup>，显然(2)式就是方差  $\sigma^2(2, t_d, \tau)$ ，而不是阿仑方差  $\sigma_y(\tau)$  ( $=\sigma(2, \tau, \tau)$ )。只要  $t_d < \tau$ ，则  $\sigma(2, t_d, \tau)$  就会小于  $\sigma_y(\tau)$ ，而且  $t_d$  愈小， $\sigma(2, t_d, \tau) / \sigma_y(\tau)$  比值也愈小。也就是说相干接收的结果使目标在近距离时可大大减轻对振荡源频率稳定度的要求。这一结论还可从频域分析得到：电波往返加上相干检波(图 1-3(b))，相当于传递函数为  $(1 - e^{-j\omega t_d})$ 。

因此系统输出的相位噪声功率谱密度就从  $S_{\phi}(f)$  变成  $2(1 - \cos \omega t_d) S_{\phi}(f)$ 。当  $t_d$  较小时, 后者将小于  $S_{\phi}(f)$ , 甚至差别很大。设计和测试工作中有意或无意忽略这种相干效应都是不对的<sup>[2]</sup>。

2. 在分析脉冲体制雷达的频率稳定度时, 首先要考虑混叠效应<sup>[2]</sup>。作者在文献<sup>[3]</sup>中曾论证: 由于一般高稳定振荡源的相位噪声谱密度远小于 1 弧度, 因此振荡源信号的射频谱  $S_c(\Delta f)$  (已对载波归一化) 和其相位噪声功率谱密度  $S_{\phi}(f)$  是一致的, 只是非常接近载频的邻近处除外。由于脉冲体制雷达的脉冲重复频率  $f_p$  (相当于采样率) 通常远小于相位噪声谱的上截频  $f_c$ , 因此远不能满足采样定理, 于是就产生混叠效应。混叠后  $S_c(\Delta f)$  与  $S_{\phi}(f)$  变为

$$\begin{aligned} |S_c^*(\Delta f)| &= \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_c(\Delta f + n f_p) \right| \\ |S_{\phi}^*(f)| &= \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_{\phi}(f + n f_p) \right| \end{aligned} \quad (3)$$

用解析法来分析混叠效应对频率稳定度的影响是困难的, 只能得到粗略的近似值。假定振荡信号的相位噪声功率谱密度可用下列三项幂律表示  $S_{\phi}(f) = f_0^2 (h_{-1} f^{-3} + h_0 f^{-2} + h_2)$ 。作近似计算并忽略高次项, 则不难发现采样后等效于信号原来的相位噪声谱密度附加了一个白噪声调相项  $h_2^*$ , 其值近似为

$$h_2^* \approx 1.165 \frac{h_{-1}}{f_p^2} + \frac{\pi^2}{6} \times \frac{h_0}{f_p^2} + \frac{f_c}{f_p} h_2 \quad (4)$$

由于混叠效应使脉冲体制雷达的频率稳定度问题远较连续波时为复杂。首先由于不满足采样定理, 从信息论观点讲是无法恢复信号的原来面目(连续波)的, 因此难以用阿仑方差来表征, 也就难以有一个统一的计量方法。其次, 由于频谱混叠, 使同一振荡源用于脉冲体制雷达后其频率稳定度将较用于连续波体制时为差。

3. 现代雷达的频率稳定度不仅与振荡源有关, 而且还与整个电路尤其是功率放大链有关。功率放大器以及其调制器(数十千伏以上)较之其他电路更易引入大量噪声和电源纹波干扰(有的文献称之为时域失真), 使频率稳定度进一步变坏。还要注意, 由放大链引入的这些干扰不受系统相干效应影响。因此在设计放大链时, 不仅电路设计、结构安排要合理, 而且屏蔽、接地、防震、滤波等问题都应周密考虑。

上述重要概念就是用解析法来分析频率稳定度的基础。但是随着电子技术的发展, 现代雷达愈来愈复杂, 仅用经典解析法往往难以得到所需结果, 有时甚至完全无能为力。这时蒙特卡洛计算机仿真法可能是最有效的工具了<sup>[4]</sup>。

蒙特卡洛仿真频率稳定度问题的基本思路和一般仿真法一样, 首先在计算机上产生随机数列来模拟各种类型的相位噪声; 再将其作为系统(数学模型)的输入量, 经大样本

运算得出所需统计估值。振荡信号相位噪声谱密度则是以 Barnes 提出的幂律关系  $S_{\phi}(f) = f_0^2(h_{-2}f^{-4} + h_{-1}f^{-3} + h_0f^{-2} + h_1f^{-1} + h_2)$  来表示。其中  $h_2$  项为白噪声性质, 可由零均值的均匀随机数列  $\{x_i\}$  来仿真。为了保证质量, 应采用混合同余法来递推产生。 $h_0f^{-2}$  项可由  $\{x_i\}$  在计算机上累加(相当于积分)而得。同理可由  $h_0f^{-2}$  得  $h_{-2}f^{-4}$ 。至于  $h_{-1}f^{-3}$  项可由  $\{x_i\}$  通过一传递函数  $G(S)$  近似于  $|S^{-1/2}|$  的 ARMA 滤波器而得。下列由作者提出的  $G(S)$ , 可保证在  $f=1\text{Hz} \sim 1\text{kHz}$  间相对误差值  $|G(f)|/|f^{-1/2}|$  不超过  $\pm 0.2\text{dB}$ :

$$G(S) = \frac{0.00666255 \frac{S^4 + 14642.86S^3 + 21415178S^2 + 3.403904 \times 10^9 S + 5.403846 \times 10^{10}}{S^4 + 4880.95S^3 + 2379464S^2 + 1.2607052 \times 10^8 S + 6.6714147 \times 10^8}}{S^4 + 4880.95S^3 + 2379464S^2 + 1.2607052 \times 10^8 S + 6.6714147 \times 10^8} \quad (5)$$

将上式变换成离散差分方程形式, 可得仿真  $h_{-1}f^{-3}$  项的随机数列  $\{u_i\}$ :

$$U_n = \varphi_1 U_{n-1} + \varphi_2 U_{n-2} + \varphi_3 U_{n-3} + X_n - \theta_1 X_{n-1} - \theta_2 X_{n-2} \quad (6)$$

式中  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$  为自回归系数;  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  为滑动平均系数。(6)式可在计算机上运算。用同样方法可由  $h_0f^{-2}$  项得到  $h_{-1}f^{-3}$  项。

蒙特卡洛法用于估算频率或相位起伏对雷达性能的影响, 被实践证明是行之有效的。作者曾用以估算: 1. 脉冲多普勒雷达 SCV 指标与振荡信号频率起伏的关系; 2. 数字稳定系统改善因子与磁控管频率起伏的关系<sup>[5]</sup>; 3. 多普勒测速时方差  $\sigma^2(2, t_d, \tau)$  与目标距离的关系<sup>[2]</sup>; 4. 脉冲压缩雷达 Chirp 波内频率起伏与压缩后旁瓣的关系<sup>[6]</sup>; 5. 合成孔径雷达天线方向图畸变与本振源频率起伏关系<sup>[4]</sup>, 等等。并得到一些工程上有用的数据图表, 读者可查阅、参考使用。

#### 四、振荡源频率不稳定对雷达性能的影响<sup>[7]</sup>

以下对几种主要现代雷达其性能受振荡源频率不稳定的影响, 分别进行讨论。

##### (一) 脉冲相干多普勒测速雷达

某些测量用雷达要求兼有多普勒测速功能。此时有关它的频率稳定度的定义、概念和表征方法是和连续波测速系统一致的。唯一不同的是因调制(采样)而使其相位噪声谱密度  $S_{\phi}(f)$  变成  $S_{\phi}^*(f)$ 。用近似估算法, 可认为新的相位噪声谱密度近似等于  $n_2^* f^2$ , 因此

$$\sigma^2(2, t_d, \tau) \approx \frac{h_2^* f_c}{2\pi^2 \tau^2} \quad (7)$$

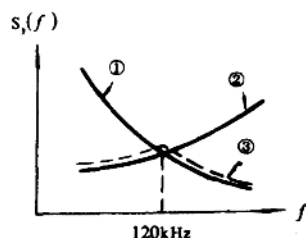


图 1-4 C 波段锁相微波源的  $S_y(f)$  曲线

以下举一实例：某自制的 C 波段体效应管振荡器，在自由振荡时其  $S_y(f) = 1.8 \times 10^{-3} / f$  (如图 1-4 曲线①所示)；另有一晶振-倍频固态微波源，其  $S_y(f) = 2.3 \times 10^{-21} + 10^{-28} f^2$  (如图 1-4 曲线②所示)。两根曲线的交点  $B_{L0} \approx 120 \text{ kHz}$ ，今以后者为基准，将前者锁相于后者，并取锁相环带宽为  $B_{L0}$ ，则此锁相微波源的  $S_y(f)$  曲线必定如图 1-4 中虚线③所示。将此锁相微波源用于连续波测速系统，并假定  $t_d = 1 \text{ ms}$ ， $\tau = 50 \text{ ms}$ ，则得

$$\sigma^2(2, t_d, \tau) \approx \frac{h_0 t_d}{2\tau} + \frac{h_2 f_c}{2\pi^2 \tau^2} = 7 \times 10^{-22}$$

$$S_0 = \sqrt{2} \sigma(2, t_d, \tau) = 3.7 \times 10^{-11}$$

若将同一振荡源用于脉冲测速雷达，考虑到图 1-4 中曲线③在  $f > 120 \text{ kHz}$  后迅速下降，因此可近似认为  $f_c = 120 \text{ kHz}$ 。令  $f_p = 1 \text{ kHz}$ ，则

$$h_2^* = \frac{\pi^2 h_0}{6} \frac{f_c}{f_p^2} + \frac{f_c}{f_p} h_2 = 1.58 \times 10^{-26}$$

$$\sigma^2(2, t_d, \tau) \approx \frac{h_2^* f_c}{2\pi^2 \tau^2} = 3.84 \times 10^{-20}$$

$$S_0 = 2.77 \times 10^{-10}$$

较连续波时约差一个数值量级。实验结果表明与上面估算是大体吻合的。

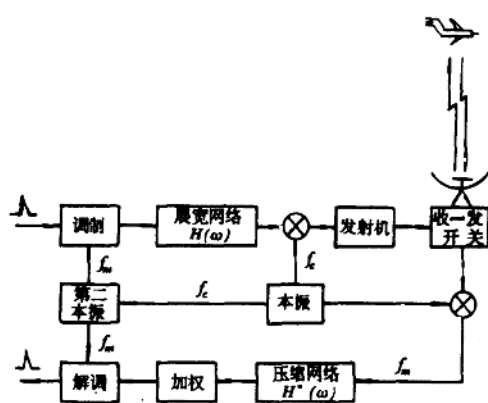


图 1-5 脉冲压缩雷达原理图

## (二) 脉冲压缩雷达

现代脉冲压缩雷达的原理可由图 1-5 来说明。这种雷达先在发射设备内用脉冲展宽网络(如声表面波器件)对原脉冲展宽，宽脉冲内载波被调频或编码调制。当回波通过接收机匹配滤波器即脉冲压缩网络时，被压缩成窄脉冲。这种雷达既具有宽脉冲雷达较高的检测能力，又能保持窄脉冲系统较好的距离分辨力。脉冲压缩的方式很多，今以最普通的线性调频方式为例，从以下两个方面来分析振荡源频率不稳定对雷达性能的影响。

### 1. 振荡源频率不稳定造成雷达测距误差<sup>[8]</sup>.

图 1-6 表示脉冲压缩雷达的本振频率起伏所造成的测距误差。由图可以看出, 在发射机方面, 原脉冲展宽成脉宽为  $\tau_e$ 、频率由  $\Delta f_m$  到零(以中频  $f_i$  为基准)的线性调频波。此中频脉冲与本振混频后得到发射信号, 其频率为  $f_0 = f_c + f_i$ 。接收到的回波再与本振混频, 又得到中频为  $f_i$  的线性调频展宽脉冲。经脉冲压缩后, 就可得到电波往返时间  $t_d$  以及目标距离。但因本振在  $t_d$  后不可避免地会有频率起伏, 假定为  $\Delta f_0$ , 那末中频展宽脉冲回波的线性调频不是从  $\Delta f_m$  到零, 而变成  $\Delta f_m + \Delta f_0$  到  $\Delta f_0$ 。这样, 经脉冲压缩和解调后的回波位置将产生误差  $\Delta t_d$ 。由图 1-5 可得

$$\frac{\Delta f_m}{\tau_e} = \frac{\Delta f_m + \Delta f_0}{\tau_e + \Delta t_d}$$

所以

$$\Delta t_d = \Delta f_0 \frac{\tau_e}{\Delta f_m} \quad (8)$$

举例: 假定允许雷达测距误差为 1.5m, 相当于  $\Delta t_d = 0.01 \mu s$ 。又假定  $\tau_e = 50 \mu s$ ,  $\Delta f_m = 5 MHz$ , 则得

$$\Delta f_0 = \Delta t_d \cdot \Delta f_m / \tau_e = 10^3 Hz$$

对 S 波段雷达言, 相当于频率稳定度为

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = 3.3 \times 10^{-7}$$

这个要求要比多普勒测速系统低得多。

### 2. 振荡源频率不稳定造成雷达虚假回波

上述本振起伏  $\Delta f_0$  实际上是随机的, 因此它对回波的影响更主要表现为产生许多虚假回波。下面对此作进一步分析。

雷达理论证明当脉冲压缩比  $M = \tau_e B$  ( $B$  为频带宽度) 足够大时, 展宽信号的幅频特性  $A(\omega)$  和相频特性  $\Phi(\omega)$  呈图 1-7 形状<sup>[9]</sup>。由图可见, 频域中展宽信号幅度、相位与频率的关系是和时域中幅度、相位与时间的关系是一致的。

假定展宽脉冲被一正弦波(频率为  $F$ )所调相, 则相当于  $\Phi(f)$  变成  $\Phi(f) \exp\{jb_p [\sin(2\pi F \tau_e / B) f + \theta_0]\}$ ; 此处  $b_p$  为调相指数,  $\theta_0$  为固定相位。根据“成对回波理论”<sup>[10]</sup>可知在脉冲压缩后, 信号中除主回波外, 还在相隔  $\Delta f = \pm F \tau_e / B$  处出现

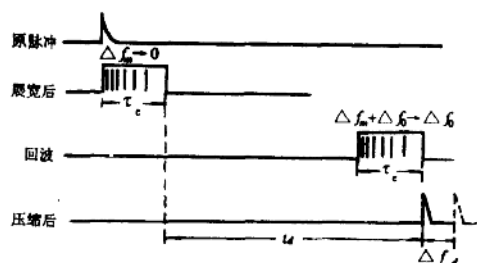


图 1-6 振荡源频率不稳定对脉冲压缩雷达测距的影响