

第二章 雷达信号频率的测量

§ 2.1 概述

一. 频率测量的重要性

1. 频率是雷达功能和用途的反映
2. 频率是选择分选和识别雷达信号的重要参数
3. 频率对准是有效干扰的有效保证

二. 指标体系:

1. 测频时间 IFM(瞬时测频)

$P_{IF1} = \Delta f_r / f_2 - f_1$ 截获时间: 达到给定截获概率所用时间 $t_{IF1} \leq T_r + t_{th}$

2. 测频范围: Ω_{RF} : 测频系统最大可测的雷达信号频率范围

瞬时带宽: Δf_r : 任一瞬时可测的频率范围

频率分辨力: Δf_r : 所能分开的两个同时到达信号的最小频率差

测频误差: $df_{\max} = \pm \frac{1}{2} \Delta f_r$

3. 信号形式: $\begin{cases} pulse: t_{\min} \\ cw \end{cases}$

a) 同时信号的分离能力 $\begin{cases} \Delta t < 10ns \\ 10ns < \Delta t < 120ns \end{cases}$

b) S_{\min}, D : 保证精确测频条件下输入信号功率变化范围

三. 技术分类:

$\left\{ \begin{array}{l} \text{频率取样法} \begin{cases} \text{搜索频率窗: 截获概率, 频率分辨力矛盾} \\ \text{毗邻频率窗: 但增加信道数量} \end{cases} \\ \text{变换法} \begin{cases} \text{相关器: 比相法 IFM} \\ \text{FFT: 压缩 (SAW), 声光, DFFT} \end{cases} \end{array} \right.$

2.2 频率搜索接收机

一. 组成 P17 Fig2-2

1. 高端: 选频
2. 中放
3. 检波, 视放
4. 信道: $f_i = mf_i + nf_r$

$$m = 1, n = -1, f_R = f_i - f_i \text{ ——主信道}$$

$$m = -1, n = 1, f_R = f_i + f_i \text{ ——镜频信道}$$

抑制镜频信道：高中频 零中频 逻辑判别

5. 超外差接收机 P19, Fig2-4

窄带超外差 宽带超外差 100 ~ 200MHz 宽带预选超外差

例 某超外差搜索接收机测频范围为[1GHZ,2GHZ]，中频频率 30MHZ，频率搜索周期 1ms，中放带宽 2MHZ，试求：

1) 本振的频率变换范围和调谐函数 $f_L(t)$

2) 若有频率为 1125MHZ 的连续波信号到达，求视频输出波形

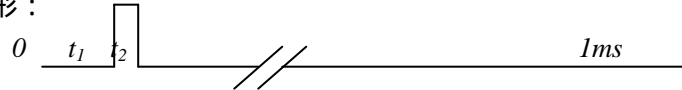
解：1) 本振频率变化范围：[1000+30MHZ,2000+30MHZ]

$$\begin{aligned} f_L(t) &= 1000\text{MHZ} + 30\text{MHZ} + (2000 - 1000)\text{MHZ} \times t' / 10^{-3} \\ &= 1030\text{MHZ} + 10^6 \text{MHZ} \times t', \quad t' = \text{mod}(t, 1\text{ms}) \end{aligned}$$

2) 在搜索过程中，输出信号有无的时间 t_1, t_2 ：

$$\begin{aligned} f_L(t_1) - 1125\text{MHZ} &= 30 - 1\text{MHZ} \\ f_L(t_2) - 1125\text{MHZ} &= 30 + 1\text{MHZ} \end{aligned} \quad \text{解得：} \begin{aligned} t'_1 &= 0.124\text{ms} \\ t'_2 &= 0.126\text{ms} \end{aligned}$$

波形：



二. 射频调谐的晶体视频接收机 P19, Fig 2-4

1. 预选器：调谐作用
2. 检波器：脉冲，电平超过门限即认为有信号
3. 增加 simin: 前选器，后选器

从此向前见赵国庆讲义

三. 频率搜索形式：

1. 分类：连续，步进，单程，双程
2. 特点：显示，控制

四. 搜索速度的选择：

a) 频率慢可靠搜索： $T_f \leq \tau_N = Z_N T_r$ ，搜索概率为 1

$$t_f = \frac{\Delta f_r}{f_2 - f_1} T_f \geq Z T_r$$

$$f_2 - f_1 \leq \frac{Z_N}{Z} \Delta f_r$$

2. 频率快速可靠搜索： $T_f \leq \tau_r \Rightarrow$

$$v_f = \frac{f_2 - f_1}{T_f} \geq \frac{f_2 - f_1}{\tau}$$

缺点：可能建立稳定大幅度振荡， $v_f \uparrow \Rightarrow$ 幅度 \downarrow

3. 频率搜索概率：

例 某宽带滤波-高中频搜索接收机测频范围为[2GHZ,4GHZ]， $Z=1$ ，被测雷达的脉冲重复周期 1ms，波束宽度 2° ，圆周扫描，周期 5 秒，试求：

1) 宽带滤波的通带，中频频率的选择，本振的搜索范围

2) 采用频率慢可靠搜索的搜索周期和最窄的接收机带宽

解：1) 宽带滤波通带：[2000MHZ,4000MHZ]

$$f_i > (4000 - 2000)MHZ / 2 = 1000MHZ, \text{选为 } 1200MHZ$$

本振搜索范围：[3200MHZ,5200MHZ]

2) 照射时间： $T_s = 5 \times 2^\circ / 360^\circ = 1/36 s$ ，取 $T_f = T_s$ ，由

$$T_f \frac{\Delta f_r}{4000 - 2000} \geq 1 \times 10^{-3} \quad \text{解得：} \Delta f_r \geq \frac{10^{-3} \times 2000}{1/36} MHZ = 72MHZ$$

§ 2.3 比相法 IFM

一. 鉴相器： $f = \omega T \rightarrow \omega = f/T$ ，P23. Fig2-9

最大相位差为： $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = 2\pi(f_2 - f_1)T = 2\pi \quad \therefore f_2 - f_1 = \frac{1}{T}$

$$u_r = 2KA^2(1 + \cos\omega T)$$

二. 正交鉴相器：

$$\begin{cases} U_I = KA^2 \cos\phi \\ U_Q = KA^2 \sin\phi \end{cases} \quad \text{——示波器或测量 } U_I, U_Q \rightarrow f$$

三. 极性量化器：

1. 二比特量化器 $0^\circ \sim 360^\circ$ 四等分， $\Delta f = 90^\circ$ $\Delta f / 4$

2. 多比特： $\cos(f - a) = \cos(a)[\cos f \sin a + \sin f \cos a]$
 $\sin(f - a) = \cos(a)[\sin f \cos a - \cos f \sin a]$

$a = 45^\circ$ 时，三比特，8 等分， $\Delta f = 45^\circ$ ， $\Delta f / 8$

$a = 22.5^\circ$ 时，四比特，16 等分， $\Delta f = 22.5^\circ$ $\Delta f / 16$

n 比特, $\Delta f = \frac{\Delta F}{2^n}$, ΔF 测频范围

四. 多路鉴相的并行运用:

1. 组成 P26 Fig2-13

$$2. \Delta f = \frac{\Delta F}{2^m \cdot n^{k-1}} = \frac{1}{2^m \cdot n^{k-1} \cdot T}$$

T——第一路延时线长度

m——每一路量化比特数

n——相邻支路延时时间差

k——并行路数

3. 码字校正:

(1) 频率编码, 高位及零点的多余路

(2) 低位灵敏, 高位不灵敏, 用低位校位高位

五. 同时到达信号检测

$$1. \text{第一类: } \Delta\phi = \phi - \phi_1, \frac{A_1^2}{A_2^2} = \alpha,$$

$$\Delta\phi = \arctan \frac{\sin(\phi_2 - \phi_1)}{\sqrt{\alpha + \cos(\phi_2 - \phi_1)}} \quad \Delta\phi_{\max} = \arcsin \frac{1}{\sqrt{\alpha}}$$

2. 第二类: 易引起错误

3. 同时到达信号检测:

单信号: 自混频, 无输出, 无标志

多信号: 混频, 有输出, 有标志

六. 误差分析: $f = wT$

$$\Delta\phi^2 = \Delta\phi_c^2 + \Delta\phi_q^2 + \Delta\phi_N^2 + \Delta\phi_i^2$$

Δf_c : 5° 鉴相器性能

Δf_q : 量化误差 $\Delta f_q = \frac{\Delta f}{2\sqrt{3}}, \Delta f = \frac{360^\circ}{2^n}$ ——最小的量化单元宽度

Δf_N : 内部噪声

Δf_i : 同时到达信号

七. IFM 接收机的组成及主要技术指标 P29, Fig2-16

1. 组成: 限幅放大器 消除幅度影响

延时鉴相器 编码, 输出频率

同时到达信号检测: 消除不可靠测量

门限检测/定时检测: 消除噪声及低 SNR 信噪比信号影响, 保证一段时间指测

量一个信号

2. 技术参数：

(1) $\Delta F = 1/T_{\min}$, T_{\min} 最短延时线长度

(2) Δf , 1MHz 频率分辨力

(3) sf 用统计描述, 如均方根法

(4) 截获概率时间: 当脉冲宽度大于最长延迟线的延迟时间时, 对单个脉冲频率截获概率 $\rightarrow 1$, 原则上讲, 频率截获时间为一个脉冲重复周期

(5) si_{\min} , -40 ~ -50dBm, D: 50 ~ 60dB

(6) 同时到达信号处理

(7) 测频时间 100 ~ 300ns

(8) 寂静时间 50 ~ 70ns

高密度信号环境下的应用受到了限制

例 某比相法瞬时测频接收机测频范围[2GHZ,4GHZ], 3 路并行运用, 相邻迟延比为 4, 最长迟延支路的量化为 3bit, 试求:

1) 三路迟延的时间, 理论测频精度

2) 若有 2223MHZ 信号输入, 试求其测频编码输出

解: 1) $T_1 = 1/(4-2)10^9 = 0.5ns$, $T_2 = 4T_1 = 2ns$, $T_3 = 4T_2 = 8ns$

$$\Delta f = \frac{1}{4^{3-1}2^3 \times 0.5 \times 10^{-9}} = 15.625MHZ$$

2) 通过第一迟延支路的相位差:

$$f_1 = 2p \times 0.5 \times 10^{-9} \times 2.223 \times 10^9 = 2p \times 1.1115$$

$$\text{取模为: } 0.1115 \times 2p, \text{ 编码: } \text{int}\left(\frac{0.1115 \times 2p}{0.5p}\right), \text{ 为 } 00$$

通过第二迟延支路的相位差:

$$f_2 = 4 \times f_1 = 2p \times 4.446, \text{ 取模为: } 0.446 \times 2p,$$

$$\text{编码: } \text{int}\left(\frac{0.446 \times 2p}{0.5p}\right), \text{ 为 } 01$$

通过第三迟延支路的相位差:

$$f_3 = 2p \times 4.446 \times 4 = 2p \times 17.784, \text{ 取模为: } 0.784 \times 2p,$$

$$\text{编码: } \text{int}\left(\frac{0.784 \times 2p}{0.25p}\right) = 6, \text{ 为 } 110$$

测频编码由高到低为: 0001110。

§ 2.4 信道化接收机

一. 基本工作原理

1. 多波道接收机 P31 Fig2 - 17
各信道彼此交叠, 覆盖测频范围
2. 纯信道化接收机 P32 Fig2 - 18
 - (1) 波段分路器
 - (2) 本振器组、混频、中放、检波、检测
 - (3) 再分波段
 - (4) 分辨力

$$\Delta f = \frac{f_2 - f_1}{\prod_{i=1}^n m_i}$$

3. 步骤

第一分路器 m_1 , 第一中放带宽 $\Delta f_{r1} = (f_2 - f_1)/m_1$,

第一中频频率 $f_{i1} > (f_2 - f_1)/2$, 第一本振组 (低外差):

$$f_{L1j} = f_1 - f_{i1} + (j + 0.5)\Delta f_{r1}, j = 0, \dots, m_1 - 1$$

第二分路器 m_2 , 第二中放带宽 $\Delta f_{r2} = \Delta f_{r1}/m_2$,

第二中频频率 $f_{i2} > \Delta f_{r1}/2$, 第二本振组 (低外差):

$$f_{L2j} = f_{i1} - \Delta f_{r1}/2 - f_{i2} + (j + 0.5)\Delta f_{r2}, j = 0, \dots, m_2 - 1$$

以此类推: 第 k 分路器 m_k , 第 k 中放带宽 $\Delta f_{rk} = \Delta f_{rk-1}/m_k$,

第 k 中频频率 $f_{ik} > \Delta f_{rk-1}/2$, 第 k 本振组 (低外差):

$$f_{Lkj} = f_{ik-1} - \Delta f_{rk-1}/2 - f_{ik} + (j + 0.5)\Delta f_{rk}, j = 0, \dots, m_k - 1$$

频率分辨力: $\Delta f = (f_2 - f_1) / \prod_k m_k$

根据接收信号通过的各检测信道 $n_k, k = 1, 2, \dots$ 进行频率估计:

$$\hat{f} = f_1 + \sum_k n_k \times \Delta f_{rk} + \Delta f/2$$

例 某信道化接收机测频范围为[2GHZ,4GHZ], 采用 4×3 结构, 试求: 1) 频率分辨力和各级接收机设计; 2) 若有 2223MHZ 信号进入, 求其在接收机中的传输信道和频率估计

解: 1) $\Delta f = (4000 - 2000)/4 \times 4 \times 4 = 31.25\text{MHZ}$

第一分路器 4，第一中放带宽 $\Delta f_{r1} = (4000 - 2000)/4 = 500\text{MHZ}$ ，

第一中频频率 $f_{i1} > (4000 - 2000)/2$ ，选为 1200MHZ，第一本振组：

$$f_{L1j} = 2000 - 1200 + (j + 0.5)500\text{MHZ}, j = 0, \dots, 3$$

分别为：1050MHZ, 1550MHZ, 2050MHZ, 2550MHZ

第二分路器 4，第二中放带宽 $\Delta f_{r2} = 500/4 = 125\text{MHZ}$ ，

第二中频频率 $f_{i2} > 500/2$ ，选为 300MHZ，第二本振组：

$$f_{L2j} = 1200 - 500/2 - 300 + (j + 0.5)125\text{MHZ}, j = 0, \dots, 3$$

分别为：712.5MHZ, 837.5MHZ, 962.5MHZ, 1087.5MHZ

第 3 分路器 4，第 3 中放带宽 $\Delta f_{r3} = 125/4 = 31.25\text{MHZ}$ ，

第 3 中频频率 $f_{i3} > 125/2$ ，选为 100MHZ，第 3 本振组：

$$f_{L3j} = 300 - 125/2 - 100 + (j + 0.5)31.25\text{MHZ}, j = 0, \dots, 3$$

分别为：153.125MHZ, 184.375MHZ, 215.625MHZ, 246.875MHZ

2) 在第一层中通过 0 信道，因为：

$$2223\text{MHZ} - 1050\text{MHZ} = 1173\text{MHZ} \in [950\text{MHZ}, 1450\text{MHZ}] \text{通带}$$

在第二层中通过 1 信道，因为：

$$1173\text{MHZ} - 837.5\text{MHZ} = 335.5\text{MHZ} \in [237.5\text{MHZ}, 362.5\text{MHZ}] \text{通带}$$

在第三层中通过 3 信道，因为：

$$335.5\text{MHZ} - 246.875\text{MHZ} = 88.625\text{MHZ} \in$$

$$[84.375\text{MHZ}, 115.625\text{MHZ}]$$

频率估计：

$$\hat{f} = 2000 + 0 \times 500 + 1 \times 125 + 3 \times 31.25 + 15.625 = 2234.375\text{MHZ}$$

4. 频带折叠信道化接收机

取和电路：为下一级省下多个分频支路，降低灵敏度容易造成频率模糊。

5. 时分制信道化接收机

用快速调速开关代替取和电路。

二. 存在问题

1. sinc 函数，多路输出，输出幅度比较，提高分辨率；

2. “兔耳”效应，频率偏移。

当信道宽度比较窄，载频偏移滤波器的中心频率较远时，由于滤波器暂态效应，在脉冲前后滤出尖峰现象。

三. 应用

大量应用

§ 2.5 压缩接收机

一. 变换原理

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt$$

令 $\omega = m\tau$, τ 为时间 ,

$$\text{则 } -\omega t = -m\tau t = \frac{m(t-\tau)^2 - m^2 - m\tau^2}{2}$$

$$F(m\tau) = e^{-jm\tau^2/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-jm^2/2} e^{jm(t-\tau)^2/2} dt ,$$

$$= ch^-(\tau) \{ [f(t)ch^-(t)] \otimes ch^+(t) \}$$

二. SAW 接收机工作原理

展宽线 : 时宽 T_E , 带宽 Δf_E , 压缩线 : 时宽 T_c 带宽 $\Delta f_c = f_2 - f_1$,

取样时间 $t_{SA} = T_c$, $\Delta f_E = 2\Delta f_c$,

采用低 LO , $f_1 : f_{L\min} + \Delta f_c$, $f_2 : f_{2\max} - \Delta f_c \rightarrow f_{L\max}$

$$\Delta f_E = f_{L\max} - f_{L\min} = 2\Delta f_c ,$$

而扩展线与压缩线的斜率一致 , 故 $T_E = 2T_c$,

$$f_1 : f_{L\min}, f_{L\min} + \Delta f_c \rightarrow [f_1 - f_{L\min}, f_1 - f_{L\min} - \Delta f_c] ,$$

$$f_2 : f_{L\max} - \Delta f_c, f_{2\max} \rightarrow [f_2 - f_{2\max} + \Delta f_c, f_2 - f_{L\max}] ,$$

压缩后的波形为辛克型 , 信号频率不一样 , f_L 和 f 混频 , 落在中放带宽内的时间不一样 ,

即取样时间不一样 , 压缩后延时 $t = \frac{f - f_1}{\Delta f_c} T_c$, t 为输出信号相对于时基触发点的延时 ,

即相对 T_c 时刻的延时。

三. 参数

$$1. \text{ 频率分辨力 } \Delta f = \frac{\Delta f_c}{n} = \frac{1}{T_c} \quad \text{瞬时带宽} = \Delta f_r = \Delta f_c$$

$$2. \quad S_{\min C} = S_{\min \theta} \frac{L_c}{D_c} \quad \text{见书 P37}$$

3. 动态范围 D 瞬时、饱和

$$4. \quad t_{SA} = T_c , t_{IF} = 2t_{SA} , P_{IF} = \begin{cases} 50\% & \text{窄脉冲} \\ 100\% & \text{宽脉冲} \end{cases}$$

$$5. \Delta t_{TOA} = 2t_{SA}$$

例 某压缩接收机测频范围为[2000MHZ,2100MHZ]，压缩滤波器中心频率 300MHZ，带宽 100MHZ，时宽 0.5μs，试求：1) 频率分辨率和扫描本振设计；2) 若有 2015MHZ 信号进入，求其输出迟延

解：1) $\Delta f = 1/0.5 \times 10^{-6} = 2\text{MHZ}$ ，扫描本振函数：

$$f_L(t) = 2000 - 300 - 100/2 + \frac{100}{0.5 \times 10^{-6}} t \text{MHZ}, 0 \leq t < 2 \times 0.5 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$= 1650 + 2 \times 10^8 t \text{MHZ}, \quad 0 \leq t < 10^{-6} \text{ s}$$

$$2) t_1 = (2015 - 2000) \times 0.5 \times 10^{-6} / 100 \text{ s} = 0.075 \text{ ms}$$

§ 2.6 声光接收机

声光调制技术透镜的空间 FFT，完成实时频谱分析

一. 声光调制器：P28 图 2 - 23 f_s 加入转换器，形成余弦声波，调制激光，发生偏转、衍射光，偏转角与被测信号频率成正比

$$\phi(x) = \phi_0 + \phi_m \cos\left(2\pi f_s \frac{x}{v_s} + \phi_i\right)$$

$$\theta_i + \theta_d = 2 \arcsin \frac{\lambda_0 f_s}{2v_s}$$

二. 空域 FT 原理

$$E(f_x) = k \int_{-D/2}^{D/2} f(x) e^{-j2\pi f_x x} dx$$

当 $s(t) = \cos 2\pi f_s t$ 时

$$f(x) = 1 + j\phi_m \cos\left(2\pi f_s \frac{x}{v_s}\right) \quad \text{转换器输出（光波相位）}$$

$$E(f_x)$$

$$= \frac{D}{2} \frac{\sin 2\pi f_x}{2\pi f_x} + \frac{j\phi_m}{2} \frac{D}{2} \frac{\sin\left(2\pi f_x + \frac{2\pi}{\lambda_s}\right)}{2\pi f_x + \frac{2\pi}{\lambda_s}} + \frac{j\phi_m}{2} \frac{D}{2} \frac{\sin\left(2\pi f_x - \frac{2\pi}{\lambda_s}\right)}{2\pi f_x - \frac{2\pi}{\lambda_s}}$$

$$= A_0 + A_{+1} + A_{-1}$$

$$\lambda_s = \frac{v_s}{f_s}$$

$$f_{x \pm 1} = \frac{\xi_{\pm 1}}{\lambda_0 F} = \pm \frac{1}{\lambda_s}$$

所以

$$|\xi_{+1}| = |\xi_{-1}| = F \frac{\lambda_0}{\lambda_s} = F \lambda_0 \frac{f_s}{v_s} = \left(\frac{F \lambda_0 T}{D} \right) f_s$$

一阶光带位置对应信号频率。

三．组成

四．特点

1． 优点：

宽带宽 0.5~1GHz 高截获概率

$$\text{频率分辨率高：} \Delta f = \begin{cases} \frac{1}{T} & t \geq T \\ \frac{1}{t} & t < T \end{cases} \quad T = D/v_s$$

同时达到信号处理能力强 FT 为线性变换

能处理复杂信号形式

灵敏度高

VF 简单

2． 缺点：

动态范围小

波形失真大

ex : 2、3、4、5、6