

## 线性调频连续波雷达扫频功率起伏对其测距精度和距离分辨力的影响<sup>1</sup>

陈祝明 丁义元 向敬成

(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

**摘 要** 实际的线性调频连续波 (LFMCW) 雷达的发射信号都有两个非理想的参数——扫频非线性和功率起伏, 它们将使 LFMCW 雷达的实际测距精度和距离分辨力下降。本文根据 LFMCW 雷达回波功率谱的特性, 从应用的角度分析了扫频功率起伏与其测距精度和距离分辨力的关系, 为 LFMCW 雷达振荡器的选择提供一个理论依据。

**关键词** 调频连续波, 雷达, 功率起伏, 距离分辨力

**中图分类号** TN958

### 1 引言

线性调频连续波 (LFMCW) 雷达由于具有很大的时带积, 因而在理论上具有很高的测距精度和距离分辨力。目前, 产生 LFMCW 信号的核心部件一般都是采用宽带的电调振荡器 (VCO)。由于振荡器结构上宽带要求低  $Q$  结构而稳定性则要求高  $Q$  结构的矛盾以及电调振荡器固有的调谐非线性和非理想频率特性, 使得其输出的 LFMCW 信号产生扫频非线性和功率起伏, 从而影响到 LFMCW 雷达的实际测距精度和距离分辨力。有关扫频非线性的影响已有论述<sup>[1,2]</sup>, 本文是从 LFMCW 雷达功率谱的特性去研究扫频功率起伏对 LFMCW 雷达产生的影响, 从应用的角度分析了 LFMCW 信号的功率起伏与 LFMCW 雷达的测距精度和距离分辨力的关系。

### 2 带有功率起伏的 LFMCW 雷达的回波功率谱

在理想线性扫频的情况下, LFMCW 雷达的发射信号可描述为

$$S_R(t) = A(t) \cos(2\pi f_i t + \frac{\pi B}{T} t^2 + \theta_i), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

其中  $f_i$  为射频的初始频率,  $\theta_i$  为振荡器的初相位,  $T$  为扫频周期,  $B$  为扫频带宽。

$S_R(t)$  经雷达与单个点目标间的距离  $R$  延迟的  $S_R(t - t_d)$  自差拍后的中频信号为

$$S_{IF}(t) = \frac{kA(t)A(t - t_d)}{2} \cos(2\pi \frac{B}{T} t_d t + 2\pi f_i t_d - \frac{\pi B}{T} t_d^2), \quad t_d \leq t \leq T, \quad (2)$$

其中  $k$  为与空间衰减和混频增益有关的系数,  $t_d = 2R/c$ ,  $c$  为光速。

由于  $t_d \ll T$ , 故  $A(t - t_d) \approx A(t)$ , 令  $kA(t)A(t - t_d)/2 \approx kA^2(t)/2 = p(t)$ ,  $p(t)$  即正比于振荡器的输出功率。再令  $\omega_{IF} = 2\pi B t_d / T$ ,  $\phi = 2\pi f_i t_d - \pi B t_d^2 / T$ , 并代入 (2) 式得

$$S_{IF}(t) = p(t) \cos(\omega_{IF} t + \phi) [U(t) - U(t - T)], \quad (3)$$

其中  $U(t)$  为阶跃函数,  $[U(t) - U(t - T)]$  为矩形窗函数。

$p(t)$  在  $[0, T]$  内按  $\Omega = 2\pi/T$  展开为傅里叶级数

<sup>1</sup> 1998-04-14 收到, 1998-11-26 定稿

$$p(t) = p_0 + \sum_{n=1}^{\infty} p_n \cos(n\Omega t + \phi_n), \quad (4)$$

其中  $p_0$  为  $p(t)$  的直流项, 即平均功率项。由  $p(t)$  的方均根值定义 LFM CW 信号的功率平坦度为

$$\xi = 10 \log \sqrt{1 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{p_n}{p_0}\right)^2}. \quad (5)$$

从 (5) 式可以看出,  $\xi$  与系数  $k$  无关, 仅取决于振荡器的功率起伏。

将 (4) 式代入 (3) 式可得

$$S_{\text{IF}}(t) = \{p_0 \cos(\omega_{\text{IF}} t + \phi) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_n}{2} \cos[(\omega_{\text{IF}} \pm n\Omega)t + (\phi \pm \phi_n)]\} [U(t) - U(t - T)]. \quad (6)$$

由于  $p(t)$  各分量相互正交且与  $\cos(\omega_{\text{IF}} t + \phi)$ 、 $U(t) - U(t - T)$  相互独立, 故 (6) 式的归一化功率谱<sup>[3,4]</sup>(正频部分) 为

$$\frac{L_s(\omega)}{(p_0/2)^2 T^2} = \text{Sa}^2 \frac{(\omega - \omega_{\text{IF}})T}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{p_n}{2p_0}\right)^2 \text{Sa}^2 \frac{[\omega - (\omega_{\text{IF}} \pm n\Omega)]T}{2}. \quad (7)$$

式中 Sa 为 sinc 函数。

由 (7) 式可以看出, 对于功率理想平坦的 LFM CW 信号,  $p_0 > 0$  且  $p_n = 0$ , (7) 式为理想的单个点目标的回波功率谱。对于实际的 LFM CW 信号,  $p_n/p_0 < 1$ , (7) 式分为两个部分: 最大值位于  $\omega = \omega_{\text{IF}}$  处的真实目标回波的功率谱——真实回波功率谱与最大值位于  $\omega = \omega_{\text{IF}} \pm n\Omega$  处、且幅度为  $[p_n/(2p_0)]^2 < 1/4$  的各项分量(雷达理论中称之为“成对回波”)的功率谱——成对回波功率谱。各成对回波功率谱的主瓣分布于  $\omega = \omega_{\text{IF}} \pm n\Omega$  处, 其中  $p_n$  最大的一项对于真实回波功率谱的影响最大, 故我们抽取  $p_n$  最大的一项  $p_k$  来讨论功率起伏对真实回波功率谱的影响并不失一般性, 即令  $p(t) = p_0 + p_k \cos(k\Omega t + \phi_k)$ ,  $k$  为自然数, 代入 (7) 式得到归一化的功率谱为

$$\frac{L_s(\omega)}{(p_0/2)^2 T^2} = \text{Sa}^2 \frac{(\omega - \omega_{\text{IF}})T}{2} + \left(\frac{p_k}{2p_0}\right)^2 \text{Sa}^2 \frac{[\omega - (\omega_{\text{IF}} \pm k\Omega)]T}{2}. \quad (8)$$

### 3 功率起伏对 LFM CW 雷达测距精度和距离分辨力的影响

对于单目标 LFM CW 雷达, 其测距方式是测定回波功率谱最大值所对应的频率, 即  $\omega_{\text{IF}}$ , 其相应的距离为  $R_{\text{IF}} = \omega_{\text{IF}} T c / (4\pi B)$ 。所以对于 (8) 式, 只要成对回波功率谱不致影响到真实回波功率谱的最大值位置, 功率起伏就不会影响到单目标 LFM CW 雷达的测距精度。对于实际的 LFM CW 雷达, 有  $p_k/p_0 < 1$ , 即  $[p_k/(2p_0)]^2 < 1/4$ ,  $0 \leq \xi_k < 0.88\text{dB}$ , 成对回波功率谱的最大值总是小于真实回波功率谱的最大值。因此, 功率起伏不会影响到单目标 LFM CW 雷达的测距精度。

对于多目标环境,LFMCW 雷达测距的前提是对目标的正确分辨,即还需考虑 LFMCW 雷达的距离分辨力。对于功率理想平坦的 LFMCW 信号,由雷达理论可知,其理想分辨力为  $\delta R = c/(2B)$ ,在归一化功率谱上对应于  $-4\text{dB}$  处所对应的频率范围<sup>[5]</sup>。

当 LFMCW 信号具有功率起伏时,其回波功率谱上除真实回波功率谱外,还存在有成对回波功率谱。成对回波功率谱对 LFMCW 雷达距离分辨力的影响分为两种情况考虑。

(1) 当  $k \geq 2$  时,回波功率谱上真实回波功率谱与成对回波功率谱的主瓣没有交叠,因其副瓣的幅值比主瓣低  $13.2\text{dB}$ ,故其相互间的影响可以忽略不计。当  $[p_k/(2p_0)]^2$  较大时,实际目标的功率谱上呈现为幅度不同的三个目标,如图 1(a) 所示。此时,对于多目标环境,较强目标的成对回波功率谱将大于较弱目标的真实回波功率谱,从而使真假目标相互混淆,无法分辨,LFMCW 雷达将完全失去对多目标的分辨能力。

从 (8) 式可以看到,成对回波功率谱的最大值点正好处于真实回波功率谱的零点上,因此,当成对回波功率谱的最大值不大于真实回波功率谱第一副瓣的最大值时,成对回波功率谱已被真实回波功率谱的副瓣所淹没,其对真实回波功率谱的影响可以忽略不计。此时,有  $[p_k/(2p_0)]^2 \leq 0.048(-13.2\text{dB})$ ,  $p_k/p_0 \leq 0.44$ ,  $\xi_k \leq 0.199\text{dB}$ 。

(2) 当  $k = 1$  时,回波功率谱上真实回波功率谱与成对回波功率谱的主瓣相互交叠,整个回波功率谱的主瓣变宽,LFMCW 雷达的距离分辨力随之下降为  $(1 \sim 1.22)\delta R$ ,如图 1(b)。

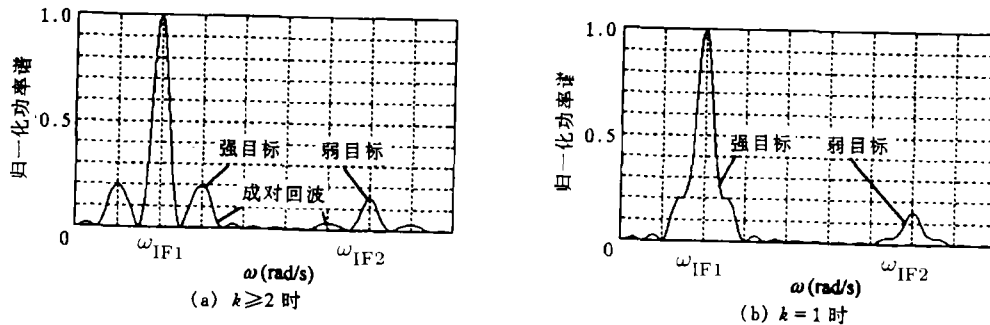


图 1 LFMCW 雷达功率起伏对其功率谱的影响

#### 4 结 论

本文着重分析了 LFMCW 雷达扫频功率起伏对其测距精度和距离分辨力的影响。从分析可以看到,对于实际的单目标 LFMCW 雷达,功率起伏不会影响其测距精度;而对于多目标环境下的 LFMCW 雷达,其距离分辨力不仅取决于其功率起伏的大小,还取决于功率起伏的快慢,但是与目标距离的远近无关。当功率起伏快于一个扫频周期且起伏值较大 ( $\xi_k > 0.199\text{dB}$ ) 时,将在真实回波功率谱的两旁产生多个较强的成对回波功率谱,从而使 LFMCW 雷达完全丧失对多目标的分辨能力,而对于较小的功率起伏值 ( $\xi_k \leq 0.199$ ),其影响完全被真实回波功率谱的副瓣所淹没,可以忽略不计;当功率起伏慢于一个扫频周期,其影响是使整个回波功率谱的主瓣展宽,从而使 LFMCW 雷达的距离分辨力下降为  $(1 \sim 1.22)c/(2B)$ 。

## 参 考 文 献

- [1] 汪学刚, 袁湘辉, 向敬成, 等. 调频线性度与零差拍线性调频连续波雷达的距离分辨力. 系统工程与电子技术, 1997, (10): 19-23.
- [2] Stove A G. Linear FMCW radar techniques. IEE Proc.-F, 1992, 139(5): 343-350.
- [3] 李在铭, 张全芬, 李晓峰编. 随机信号分析及工程应用. 成都: 电子科技大学出版社, 1990, 95-109.
- [4] 郑君里, 杨为理, 应启珩编. 信号与系统. 北京: 高等教育出版社, 1984, 247-253.
- [5] 斯科尔尼克 M I 著, 林茂庸译. 雷达系统导论. 北京: 国防工业出版社, 1992, 69-74.

THE EFFECTS OF POWER UNDULATION IN  
FREQUENCY SWEEP ON THE RANGE PRECISION AND  
RANGE RESOLUTION OF LFM CW RADAR

Chen Zhuming    Ding Yiyuan    Xiang Jingcheng

*(Department of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu 610054)*

**Abstract** The transmitting signal of Linear Frequency Modulation Continuous Wave (LFMCW) radar has two nonideal parameters: sweep nonlinearity and power undulation. They make the practical range precision and range resolution of LFM CW radar decrease. This paper analyses the effects of the power undulation on the range precision and range resolution according to the echo power spectrum of LFM CW radar, and gives theoretical bases for choosing its oscillator.

**Key words** FMCW, Radar, Power undulation, Range resolution

- 陈祝明: 男, 1966年生, 博士生, 从事雷达系统与信号处理方面的研究, 曾获电子部科技进步一等奖。  
丁义元: 男, 1936年生, 教授, 长期从事雷达系统、信号处理、微波、毫米波及应用方面的研究。发表论文多篇, 曾获电子部科技进步一等奖。  
向敬成: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 国家教育部科技委委员, 四川省电子学会信号处理专业委员会主任委员。长期从事雷达系统、信号处理等方面的教学与研究, 发表多篇学术论文。