

# 频相扫三坐标雷达目标中频回波模拟研究

张伟<sup>1,2</sup>, 邹林<sup>2</sup>, 汪学刚<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学电子科学技术研究院 成都 610054; 2. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**分析了频相扫三坐标雷达的工作原理以及目标中频回波模拟的必要性,在此基础上建立了比较全面和逼真的目标中频回波模型,并给出了频相扫三坐标雷达的目标中频回波的模拟方法。仿真结果表明该方法较好地反映了频相扫三坐标雷达的目标特性,在频相扫三坐标雷达系统的性能评估中得到了很好的应用。

**关键词** 三坐标雷达; 频相扫; 模拟; 目标  
**中图分类号** TN955 **文献标识码** A

## A Study of Target IF Return Simulation for Frequency-Phase Scanning 3-D Radar

ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, ZOU Lin<sup>2</sup>, and WANG Xue-gang<sup>2</sup>

(1. Research Institute, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** This paper analyses the principle of frequency-phase scanning 3-D radar and the necessity of target IF return simulation and proposes a complete and accurate model of target IF return and its realization method. The research result is applied to evaluate the performance of frequency-phase scanning 3-D radar successfully.

**Key words** 3-D radar; frequency-phase scanning; simulation; target

防空警戒三坐标雷达作为防空系统中的骨干雷达,其体制可分为固定多波束(叠层多波束和合成多波束)体制、一维电扫(频扫、一维相扫和频相扫)体制和二维相扫(相控阵)体制三类<sup>[1]</sup>。频相扫体制兼有频扫数据率高和相扫波束控制灵活的优点,可将能量按需分配给一个波束,并可进行MTD等信号处理,有效提高雷达的检测能力和抗干扰能力,在实战中具有重要的应用。因此,对其在复杂电子战环境下的性能评估,是一个重要而有意义的课题。

常规的雷达信号模拟大都采用相干视频信号模拟,前提是接收机为线性响应,接收信号下变频到零中频后相位特性不会发生改变,因而可以直接在视频上对信号进行模拟。但是,在实际的雷达接收机处理中存在大量的如限幅、量化和设备本身等非线性因素<sup>[2-3]</sup>,因此在中频上对目标回波进行模拟会更加准确和合理;此外,为评估宽带干扰信号对雷达接收机的干扰效果,也需在中频上进行信号模拟,虽然这会带来模拟数据量的大大增加,但却是对雷达对抗与反对抗进行逼真模拟的有效方法。

本文首先全面介绍了目标中频回波建模的一般

方法,然后基于频相扫体制三坐标雷达,对其中频目标回波模拟进行了比较深入的讨论。

### 1 目标中频回波建模

由于一般的飞行器尺寸小于防空警戒雷达的分辨单元,可以按照点目标进行建模。假设窄带信号发射信号  $S(t)$  的复数表达式为:

$$S(t) = u(t) \exp(j2\pi f_0 t) \quad (1)$$

式中  $f_0$  是载频;  $u(t)$  是复载波  $\exp(j2\pi f_0 t)$  的复调制函数。由目标反射后的回波信号  $S_r(t)$  简化后可表示为<sup>[4-5]</sup>:

$$S_r(t) = Ku(t - \tau) \exp[j2\pi(f_0 + f_d)t] \\ K = \left[ \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \right]^{\frac{1}{2}} \gamma G e^{-j2\pi f_0 \tau} \quad (2)$$

式中  $K$  为散射体距离电压系数;  $f_d$  为目标的多普勒频率,  $f_d = 2v/\lambda$ ,  $v$  为目标与雷达的径向速度,  $\lambda$  为雷达波长;  $\tau$  为双程距离延迟时间,  $\tau = 2R/C$ ,  $C$  为光速,  $R$  为目标与雷达间的距离;  $L$  为传播与系统损耗因子;  $G$  为雷达单程天线增益;  $\gamma = \sqrt{\sigma} \exp(j\phi)$  为

目标的复反射系数,用以描述目标反射特性的振幅和相位,相对应的功率 $|\gamma|^2$ 即是目标的雷达截面积 $\sigma$ 。因此,对点目标散射特性的描述,使用三个参数 $K$ 、 $f_d$ 、 $\tau$ 就完全足够了。由式(2)可以看出,目标的距离电压系数受目标雷达截面积、天线增益、距离及传播衰减因子的影响;目标的多普勒频率与目标相对于雷达的位置和相对速度有关;目标的延迟时间与距离有关。因此,要完整地模拟目标中频回波,需要分别建立目标截面积起伏模型、目标受天线方向图调制的模型、目标运动模型,同时还需考虑雷达发射的波形。

1.1 目标起伏模型

当目标处于运动状态,或雷达的波长或极化方式发生变化时,目标雷达截面积会随之起伏变化,通常用一些比较合理的统计模型来描述其起伏变化特性。常用的点目标起伏模型是Swerling(斯威林)模型<sup>[4]</sup>,该模型将起伏分为四种类型,分别对应指数分布快、慢起伏类型(Swerling I型和II型)和 $\chi^2$ 分布快、慢起伏类型(Swerling III型和IV型)。

1.2 目标受天线方向图调制模型

三坐标雷达为了提高测高精度,多采用单脉冲天线在俯仰方向上进行比幅测角<sup>[5]</sup>,即在一个波位上由两个形状相同部分重叠的子波束分别对接收到的目标回波进行幅度调制,雷达将两路信号进行和差处理,由和差信号比较可以得到目标偏离天线轴心的大小。要模拟 $\Sigma$ 、 $\Delta$ 通道的目标回波信号,必须建立相应的天线方向图模型。

用子波束表示的和波束、俯仰差波束的等效方向图为:

$$\begin{cases} F_{\Sigma}(\alpha, \beta) = F_1(\alpha, \beta) + F_2(\alpha, \beta) \\ F_{\Delta\beta}(\alpha, \beta) = F_1(\alpha, \beta) - F_2(\alpha, \beta) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\begin{cases} F_1(\alpha, \beta) = F(\alpha, \beta - \theta_{sub}) \\ F_2(\alpha, \beta) = F(\alpha, \beta + \theta_{sub}) \end{cases}$ ,  $F(\alpha, \beta)$  为子波束,

相对于其中心的方向图函数,子波束间夹角为 $2\theta_{sub}$ 。

为了能够较为准确地体现天线主瓣和旁瓣对目标的调制效果,对主瓣和第一旁瓣采用常见的高斯形状建模,其余旁瓣由于电平较低、受噪声影响具有不规则的起伏,看作是平均旁瓣,其值为常量 $g_2$ 。

天线子波束在水平轴线方向和俯仰轴线方向的方向图函数分别为 $F(a)$ 和 $F(\beta)$ ,若旋转对称,则可以统一表示为图1。

子波束主瓣方向图函数为高斯形:

$$F_{MB}(\theta) = \exp[-2\ln 2(\theta^2 / \theta_0^2)] \quad (4)$$

式中  $|\theta| \leq \mu_1$ ,  $\mu_1 = \theta_0 \sqrt{\ln g_2 / (-2\ln 2)}$ ;  $\theta_0$  为半功率点夹角;  $\theta$  是目标偏离子波束中心的角度;  $u_1$  是主瓣增益等于 $g_2$ 时的 $\theta$ 值。

设天线子波束第一旁瓣方向图函数用中心位置为 $\pm 1.5\mu_1$ 的高斯函数描述为:

$$F_{SL_1}(\theta) = g_1 \exp[-2\ln 2(|\theta| - 1.5\mu_1)^2 / \theta_{SL_1}^2] \quad (5)$$

$$\mu_1 < |\theta| \leq 2\mu_1, \theta_{SL_1} = 0.5\mu_1 \sqrt{-2\ln 2 / \ln(g_2/g_1)}$$

式中  $g_1$  为第一旁瓣的峰值,取值 $\theta_{SL_1}$ ;  $\theta = \pm \mu_1$ ,  $\pm 2\mu_1$  时第一旁瓣增益为 $g_2$ 。

需要说明的是,由于频相扫雷达在方位上采用机扫,仰角上采用相频扫,因此,天线子波束随着天线仰角不同而在俯仰方向产生展宽效应,子波束俯仰方向图函数 $F(\beta)$ 的半功率点夹角 $\theta_0 = \theta_B / \cos \theta_r$ ,其中 $\theta_r$ 为天线俯仰角; $\theta_B$ 为 $\theta_r = 0$ 时子波束俯仰方向图的半功率点夹角。

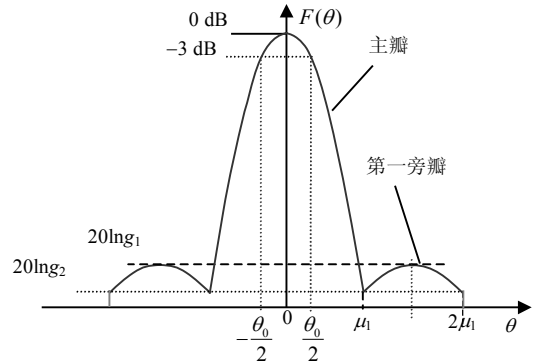


图1 天线子波束方向图

1.3 目标运动模型

目标的运动引起目标与雷达间距离的变化以及多普勒频率的变化,在给定的天线方向图条件下,目标位置与雷达的波束指向还确定了目标受天线调制的大小。因此,建立合理的目标运动模型,并获得动态的目标位置与速度矢量也是目标模拟的重要因素。简单的方案是,用匀加速直线运动模拟目标直线飞行,用水平恒向心加速度运动模拟目标水平运动。更为逼真的目标运动模型需要目标在空间运行的运动参数。建立目标的运动方程后,可计算出某一点目标 $T$ 相对雷达为原点 $O$ 的位置和速度矢量分量分别为 $V_1$ 和 $V_2$ 。那么,根据空间解析几何<sup>[6]</sup>,可以计算空间矢量 $V_1$ 与速度矢量 $V_2$ 的夹角余弦,速度矢量 $V_2$ 在空间矢量 $V_1$ 方向上的投影就是引起目标多普勒频移的目标相对于雷达的径向速度 $v$ 。

1.4 波形和波形调制

在对目标的散射特性建模后,完成点目标中频

回波的模拟还需要根据雷达发射波形对目标数据进行波形调制。由于信号的复包络函数定义为:

$$u(t) = a(t)e^{j\varphi(t)}$$

式中  $\varphi(t)$  为相位调制函数, 将其带入式(2), 并不失一般性, 不考虑  $\tau$ , 可得:

$$S_r(t) = Ka(t)e^{j[2\pi(f_0+f_d)t+\varphi(t)]}$$

对于二相编码,  $\varphi(t)$  只有  $0$  或  $\pi$  两个值; 对于LFM信号  $\varphi(t) = \pi Bt^2/T$ ,  $a(t)$  通常为矩形。

## 2 三连波束的目标中频回波信号模型

频相扫三坐标雷达采用脉内频扫和脉间相控, 在方位上机扫, 仰角上采用相频扫, 仰角波束受每

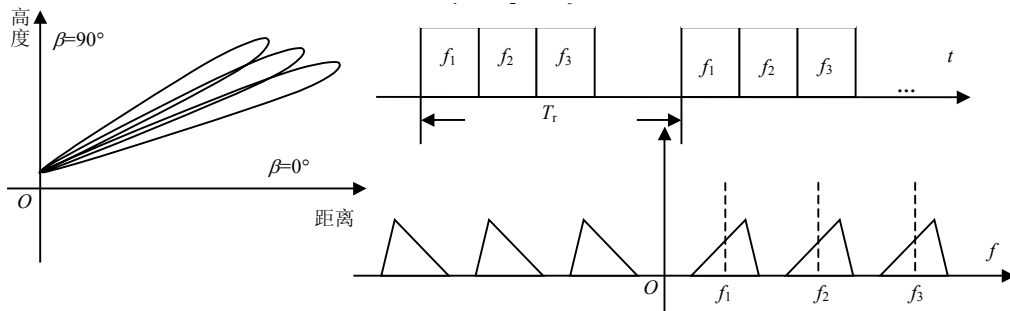


图2 三连波束空间、时域和频域示意图

根据上述原理, 对于三连波束, 其和通道、俯仰差通道以及辅助天线通道(无方向性天线, 用于自适应天线旁瓣对消)的目标相干脉冲串回波(脉冲数为  $N$ )的复指数可以统一表示为:

$$S(t) = S_1(t) + S_2(t) + S_3(t) = \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^N a_n K_{in} u_i(t - \tau - \sum_{j=1}^{i-1} T_j) e^{j2\pi[(f_i + f_{di})(t - nT_m - \sum_{j=1}^{i-1} T_j)]} \quad (6)$$

式中  $t$  为发射脉冲开始算起的时间, 且  $0 \leq t < T_r$ 。

三个通道目标回波的区别在于距离电压系数  $K_i$  不同。对于和通道回波:

$$K_{in} = \left[ \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \right]^{\frac{1}{2}} \gamma_{in} G_{si}, \quad G_{si} = |F_{\Sigma i}(\alpha, \beta)|^2$$

对于差通道回波:

$$K_{in} = \left[ \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \right]^{\frac{1}{2}} \gamma_{in} G_{\Delta i} \quad G_{\Delta i} = |F_{\Delta i}(\alpha, \beta)|^2$$

对于辅助通道回波:

$$K_{in} = \left[ \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \right]^{\frac{1}{2}} \gamma_{in} \sqrt{G_{si}} \sqrt{G_a}$$

式中  $G_a$  为辅助天线增益;  $F_{\Sigma i} = F_{i1}(\alpha, \beta) + F_{i2}(\alpha, \beta)$ ,  $F_{\Delta i} = F_{i1}(\alpha, \beta) - F_{i2}(\alpha, \beta)$ ,  $i=1 \sim 3$ 。  $F_{i1}(\alpha, \beta)$ 、

$F_{i2}(\alpha, \beta)$  ( $i=1 \sim 3$ ) 分别代表三个波束内两个俯仰子波束的天线方向图函数。  $\gamma_{in}$  ( $i=1 \sim 3, n=1 \sim N$ ) 分别为三个波束的目标复反射系数。目标复反射系数因三个波束的载频不同而不同, 并且对于快起伏类型目标, 脉间发生变化, 对于慢起伏类型, 扫描间发生变化。  $a_n$  是复加权序列, 对于均匀相干脉冲列  $a_n=1$ , 对于因发射机不稳带来的非相干脉冲列  $a_n$  为随机数。  $T_m$  为参差脉冲重复周期, 用于消除MTI盲速效应<sup>[9]</sup>。  $u_i(t)$  ( $i=1 \sim 3$ ) 分别为三个波束的复包络函数。同一目标到达三个波束的多普勒频率因相对三个波束中心偏角  $\beta_i$  不同而不同:

$$f_{di} = 2v/\lambda \cos \alpha \cos \beta_i \quad i=1 \sim 3$$

## 3 目标模拟及仿真结果

根据以上所讨论的模型, 在三坐标雷达软件仿真系统(TDRSS)<sup>[10]</sup>中对三连波束的目标中频回波进行了模拟, 模拟包括两个步骤: (1) 在TDRSS环境中对目标进行轨迹设置, 计算相关参数; (2) 根据得到的参数, 产生目标点迹的三连波回波。

需要说明的是, 在建立目标起伏模型以后, 对目标起伏的模拟在于如何产生服从指数分布和  $\chi^2$  分布的随机数。对于指数分布随机数, 可以采用直接抽样法; 对于  $\chi^2$  分布采用舍选法。

对目标航迹设定的画面如图3所示。在TDRSS中根据目标航迹设定,对产生的目标回波数据进行接收、信号处理和数据处理后的得到结果如图4所示。航迹参数为:5个交叉飞行的目标的点迹;作匀速直线运动;速度为400 m/s。

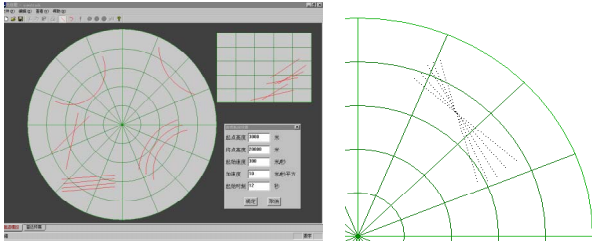


图3 目标航迹设定画面

图4 匀速直线运动航迹交叉对目标点迹的三连波中频回波仿真结果如图5~7所示。

目标点迹参数分别为:方位角 $0^{\circ}$ ;俯仰角 $2.5^{\circ}$ ;平均雷达截面积 $10\text{ m}^2$ ;起伏类型Swerling4;多普勒频率5 kHz;距离105 km。

雷达工作参数分别为:时分发射模式;当前雷达波束指向水平方位角 $0^{\circ}$ ;波束宽度 $1.5^{\circ}$ ;俯仰角 $0.5^{\circ}$ ;波束宽度 $1.7^{\circ}$ ;高斯天线方向图;系统采样率132 MHz。

三连波参数:脉冲宽度设为 $T_1=29\ \mu\text{s}$ 、 $T_2=25\ \mu\text{s}$ 和 $T_3=22\ \mu\text{s}$ ;发射波形为LFM;载波频率分别设为 $f_1=11\ \text{MHz}$ 、 $f_2=33\ \text{MHz}$ 和 $f_3=55\ \text{MHz}$ ;  $T_r=264\ \text{Hz}$ ;重复脉冲个数为7。

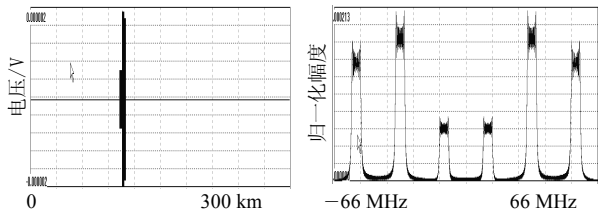


图5 目标三连波中频回波时域波形(一个周期)

图6 目标三连波中频回波频域波形

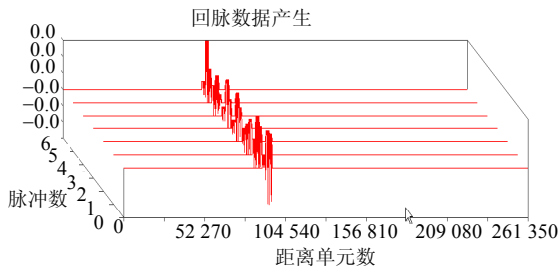


图7 目标三连波中频回波三维时域波形

图8为脉压后输出(图中仅显示了对三连波中第一个波束进行接收混频、解调、抽样、脉冲压缩后输出)。

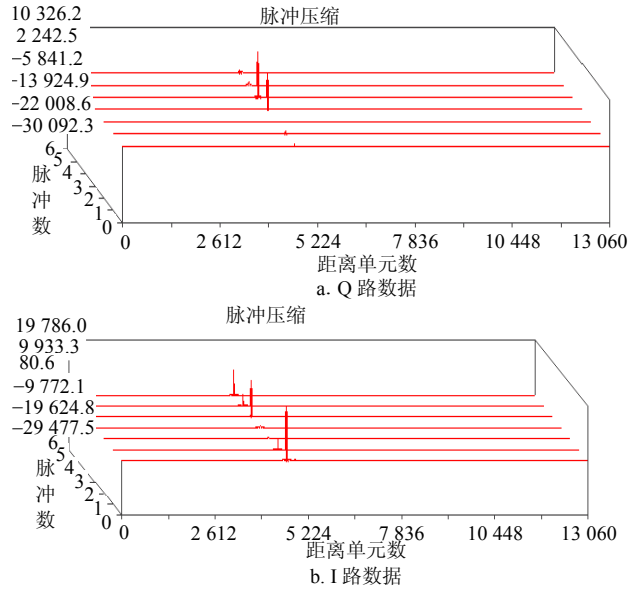


图8 脉压输出时域波形

### 4 结论

本文建立了目标中频回波模型,根据目标的起伏模型、目标受天线方向图调制模型、目标运动模型和波形仿真等基础,对于频相扫三坐标雷达三联波束的目标中频回波进行了仿真。仿真结果表明回波模型及其实现合理可信,并且能成功地应用于三坐标雷达软件仿真系统(TDRSS)中,为雷达系统的仿真和评估提供了逼真的回波源,后续工作将根据对目标散射特性和运动特性的研究,进一步增加目标回波模拟的逼真性。

### 参考文献

- [1] 陈振邦. 现代防空三坐标雷达技术体制评述[J]. 现代防御技术, 1994, 22(3): 27-35.
- [2] 高梅国, 毛二可. 雷达模拟器[J]. 电子对抗, 1999, 23(1): 6-12.
- [3] 孙晓闻, 张林让, 吴顺君. 脉冲多普勒雷达信号处理仿真[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(11): 1555-1558.
- [4] MITCHELL R L. Radar signal simulation[M]. Boston: Artech House Inc, 1976.
- [5] BARTON D K. Modern radar system analysis[M]. Boston: Artech House Inc, 1988.
- [6] 丘维声. 解析几何[M]. 第2版. 北京: 北京大学出版社, 1996.
- [7] 郭燕昌, 钱继曾, 黄富雄, 等. 相控阵和频率扫描天线原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- [8] PELL C. Phase array radars[M]. Paris: Microwave Exhibitions & Publisher Ltd, 1988.
- [9] SCHLEHER D C. MTI and pulsed Doppler radar[M]. Boston: Artech House Inc, 1990.
- [10] ZHANG Wei, WANG Xue-gang, XIANG Jing-cheng. The system simulation of three dimensional radar[J]. Journal of Electronics Science (China), 2004, 21(5): 407-412.

编辑 熊思亮