

# 远程预警相控阵雷达回波视频仿真研究\*

孟宏斌, 李文臣, 牛 岩, 张社欣

(63880 部队, 河南洛阳 471003)

摘要: 为了满足波束数据率和探测距离的双重要求, 远程预警相控阵雷达通常采用多波束技术, 一般为分时串行多波束发射和并行多波束接收。信号产生与处理是雷达仿真系统的重要组成部分, 研究了远程预警相控阵雷达回波视频仿真技术, 给出了雷达多波束线性调频回波信号模型。根据调度提供的目标位置、波束指向和波形参数, 模拟目标回波, 并分析了目标的测量位置分布特点。相参数字视频信号仿真证明了多波束信号模型和相关分析, 再现了多波束信号的处理过程。

关键词: 多波束; 视频仿真; 线性调频; 相控阵雷达

中图分类号: TN957 文献标志码: A

## Echo Coherent Video Simulation of Long Range Early Warning Phased-array Radar

MENG Hongbin, LI Wenchen, NIU Yan, ZHANG Shexin

(No. 63880 Unit, Henan Luoyang 471003, China)

Abstract: Long range early warning phased-array radar use multi-beam technology to satisfy the double demands of beam data frequency and radar range. It usually has time-sharing multi-beam serial transmitting and parallel receiving. Signal generating and processing is the main element in radar system simulation, the echo video simulation of long range early warning phased-array radar is studied, and the echo signal model of radar multi-beam linear frequency modulation is given. Base on the target location, the beam direction, and the waveform parameters, the target echo is simulated to analyze the distributed characteristic of target measured location. The coherent video simulation proved the multi-beam signal model, and reconstruct the processing procedure of multi-beam signal.

Keywords: multi-beam; video signal simulation; linear frequency modulation; phased array radar

### 0 引言

相控阵雷达使灵活的波束控制变为现实, 通过计算机控制实现波束的跳变扫描是相控阵雷达体制所特有的<sup>[1]</sup>。为了满足波束数据率和探测距离的双重要求, 相控阵雷达利用灵活的波束控制能力实现多波束技术, 一般为分时串行多波束发射和并行多波束接收, 即用单个波束分时发射来实现多波束发射, 一般为相邻波位, 每个波束发射一个脉冲, 用单脉冲实现测距和测向; 用同时多波束实现对不同波束方向信号的接收, 各接收波束分别匹配接收和分析, 得到目标位置信息, 例如美国的 AN/FPS-115。多波束的采用可以弥补搜索空域内要有较高的数据率和远程探测距离的矛盾, 满足空间搜索数据率的要求。

仿真技术是研究雷达系统性能的重要方法<sup>[2]</sup>, 文中研究雷达多波束相参视频信号仿真, 建立多波束仿真模型, 重点分析了线性调频信号多波束仿真模型, 并以远程空间监视相控阵雷达为例, 进行了探测性能的仿真。

### 1 雷达多波束信号模型

#### 1.1 雷达串行多波束发射信号

为了满足搜索数据率的要求, 预警雷达特别是远程预警雷达多采用多波束, 如图 1 为串行三波束的情况。雷达多波束发射信号可描述为:

$$S_t(t) = \sqrt{\frac{P_t R_{\text{resistance}}}{L_t}} g_w(\theta) \exp(j\omega_c t) v(t) \quad (1)$$

式中:  $\omega_c$  为载频,  $P_t$  为发射机峰值功率;  $R_{\text{resistance}}$

\* 收稿日期: 2008-08-20

作者简介: 孟宏斌(1971-), 男, 陕西人, 硕士, 研究方向: 电子系统建模仿真与评估。

为系统阻抗;  $L_t$  为发射综合损耗;  $g_m(\theta)$  为发射天线方向图在  $\theta$  方向的增益倍数;  $v(t)$  为复调制函数, 它是  $N_p$  个宽度为  $T_r$  的矩形脉冲构成的脉冲串。考虑到脉间捷变频和线性调频, 则有:

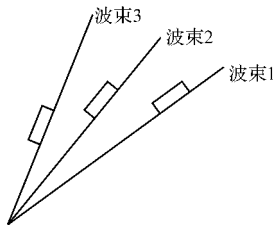


图 1 发射波束示意图

$$v(t) = \sum_{k=0}^{N_p-1} \text{rect}\left[\frac{t-kT_r}{T_p}\right] \mu(t-kT_r) \exp(j\omega_k t) \quad (2)$$

其中:  $\text{rect}(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, 1] \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$ ,  $\omega_k$  为第  $k$  个脉冲的角频率增量,  $T_r$  为脉冲重复周期, 即 PRI,  $T_p$  为脉冲宽度,  $\mu(t)$  为单个调制函数。

对于线性调频:

$$\mu(t) = \mu_{\text{LFM}}(t) = \exp(j\pi b t^2), 0 \leq t \leq T_p \quad (3)$$

式中,  $b$  为线性调频扫描频率, 它与频率扫描范围  $BW_{\text{rg}}$  的关系为:  $b = \pm BW_{\text{rg}}/T_p$ , 由于  $BW_{\text{rg}}$  近似等于压缩后的雷达脉冲宽度  $\tau_c$  的倒数, 故有  $|b| \approx \frac{1}{T_p \tau_c}$ , 而脉压比  $D = T_p/\tau_c$ , 故有  $|b| \approx \frac{1}{D \tau_c^2} = \frac{D}{T_p^2}$ 。

### 1.2 目标并行多波束回波信号

远程空间监视相控阵雷达采用分时串行多波束实现监视功能, 接收采用同时并行多波束, 每个脉冲对应一个方向, 因为发射波束相邻, 因此接收到的多波束雷达回波信号相互叠加, 各波束接收到对应发射波束方向的信号不但包括该发射波束的回波, 而且混合有其它波束的雷达回波。虽然各发射波束载波不同, 各波位之间相互影响很小, 但在数字视频信号仿真中为了体现雷达回波信号的真实性, 多波束雷达信号模型要包含各波束之间的相互接收影响。如图 1 中 1 号波束, 可能被 2 号乃至 3 号波束接收到。第  $m$  个波束(第  $m$  个脉冲)方向, 接收到的目标回波射频信号  $S_m(t)$ , 文献[3] 可以解算得到表达式:

$$S_m(t) = \text{rect}\left[\frac{t-T_L}{T_d-T_L}\right] \sum_{n=1}^N \text{rect}\left[\frac{t-\frac{2R}{C}-mT_r}{T_p}\right]$$

$$\sqrt{\frac{P_t Z}{(4\pi)^3 L_s}} \frac{g_{\text{in}}(\theta) g_{\text{rm}}(\theta)}{R^2} \lambda_n \sqrt{\sigma} K_{\text{RF}} \exp\left[j\omega_c(t - \frac{2R}{C} - mT_r)\right] \exp\left[j\omega_n(t - \frac{2R}{C} - mT_r)\right] \exp$$

$$\left[j\pi b(t - \frac{2R}{C} - mT_r)^2\right] \exp\left[j\omega_d t - j2\pi \frac{2R}{\lambda}\right] \quad (4)$$

其中:  $\text{rect}\left[\frac{t-T_L}{T_d-T_L}\right]$  为采样时间段,  $T_d$  为调度间隔时间, 即发射  $N$  个脉冲并接收的时间长度,  $T_L$  为采样起始时间,  $T_d - T_p \geq T_L \geq (N-1)T_r + T_p$ , 满足采样长度大于脉冲宽度且发射时不接收;  $T_r$  脉冲重复周期,  $T_p$  为脉冲宽度,  $N$  为脉冲(或波束)数目,  $P_t$  为雷达发射机峰值功率,  $g_{\text{in}}(\theta)$  为第  $n$  个波束在目标  $\theta$  方向的雷达发射天线增益倍数,  $g_{\text{rm}}(\theta)$  为第  $m$  个波束在目标  $\theta$  方向的雷达接收天线增益倍数,  $Z$  为系统阻抗,  $L_s$  为雷达发射接收综合损耗(包括发射损耗  $L_t$ , 接收损耗  $L_r$ , 双程大气损耗  $L_{\text{dq}}$  及波束损耗  $L_{\text{BS}}$  等),  $\sigma$  为目标的 RCS,  $\lambda_n$  为发射  $n$  波束方向的信号工作波长,  $K_{\text{RF}}$  为射频滤波电压放大系数,  $C$  为光速, 即  $3 \times 10^8$  m/s,  $\omega_c$  为载频,  $\omega_n$  为发射  $n$  波束的信号捷变频增量,  $\omega_d$  为多普勒频率,  $R$  为第  $n$  个脉冲与目标相遇时, 目标相对于雷达的距离,  $b$  为线性调频速率。

$$\text{目标回波功率 } P_{\text{vmm}} = \frac{P_t g_{\text{in}}^2(\theta) g_{\text{rm}}^2(\theta) \lambda_n^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_s}, \text{天}$$

线增益倍数在差波束情况下有负情况出现, 因为差波束有负相位情况, 转换到电压值后, 应该把接收的信号倒相, 即乘  $-1$ , 因此仿真信号的电压应该根据增益倍数的正负乘上相应的符号, 其它和差通道信号的模拟也有同样情况。

## 2 多波束雷达信号数字仿真与分析

### 2.1 多波束雷达信号数字仿真分析

为了验证数字多波束模型, 文中采用数字视频信号仿真, 相干视频仿真信号分为 I、Q 两个支路(复信号), 在视频或等价效果的频率信号产生, 不考虑电波路径引起的相位影响。匹配滤波输出信号经包络检波后对相位信息不敏感, 输出信号和载波信号没有关系。

1) 根据波位调度和探测距离的需要合理地选择信号波形, 在视频对  $m$  波束发射信号采样得:

$$h_n(i) = A_s \exp\left[j\omega_n(i \frac{1}{f_s} - \frac{2R}{C} - mT_r)\right] \times \exp\left[j\pi b(i \frac{1}{f_s} - \frac{2R}{C} - mT_r)^2\right] \quad (5)$$

其中:  $i = 0, 1, \dots, M-1$ ,  $A_s$  为发射信号幅度, 线性调频率  $b = B/T_p$ ,  $M = f_s \cdot T_p$  为信号采样点数,  $f_s$  为采样频率,  $T_p$  为脉宽, 信号带宽  $B = bT_p$ ,  $D = BT_p$  为脉压比。

2) 数字多波束接收信号模型根据发射信号的频率和所发射的波形参数可以仿真出目标回波视频信号。众所周知单脉冲测量定位采用和差通道接收系统,因此在仿真中产生和差三通道雷达接收到的目标回波视频信号时,依照波束发射方向的不同分别产生,第  $m$  个波束(第  $m$  个脉冲)方向,和差通道  $k$  接收到的目标回波视频信号  $S_{mk}(t)$  可表达为:

$$S_{mk}(t) = \text{rect}\left[\frac{t - T_L}{T_d - T_L}\right] \sum_{n=1}^N \text{rect}\left[\frac{t - \frac{2R}{C} - mT_r}{T_p}\right] \sqrt{\frac{P_t R_{\text{resistance}}}{(4\pi)^3 L_s} \frac{g_{tn}(\theta) g_{vmk}(\theta)}{R^2} \lambda_n \sqrt{\sigma} K_{\text{RF}}} \exp\left[j\omega_n \left(t - \frac{2R}{C} - mT_r\right)\right] \exp\left[j\omega_d t - j2\pi \frac{2R}{\lambda}\right] \exp\left[j\pi b \left(t - \frac{2R}{C} - mT_r\right)^2\right] \quad (6)$$

其中: $S_{mk}(t)$  中  $m$  表示第  $m$  个接收波束,  $k$  表示和差通道,  $g_{vmk}$  为目标方向的接收机和差通道增益,  $k = 1$  和通道;  $k = 2$  方位差通道;  $k = 3$  俯仰差通道。可以将  $g_{vmk}(\theta)$  提出,用剩余项产生的目标回波分别与  $g_{vmk}(\theta)$  相乘得到 3 个和差通道数据,这样可以减少数据运算量。产生离散采样信号,采样率  $f_s$ ,上式中  $t = i/f_s$ ,随着  $i$  变化取整数值可以得到数字回波仿真信号。有多个目标时,可以将各个数字回波信号相叠加得到。

3) 滤波器设计。在数字仿真中,首先将雷达接收信号去掉载波信号,成为视频信号或直接在视频进行仿真,对接收信号用各波束的视频信号匹配滤波,实现脉压处理。对  $m$  波束发射信号采样,取  $A_s = \frac{B}{f_s} \cdot \frac{1}{\sqrt{D}}$  时为归一化匹配滤波函数系数,  $h_m(n)$  频域的复共轭作为归一化的匹配滤波频域滤波函数,可以得到理想匹配滤波器雷达脉压输出的视频为:

$$y'(n) = \text{IFFT}[\text{FFT}(x(n))\text{FFT}^*(h_m(n))] \quad (7)$$

在进行 FFT 或 IFFT 运算时,根据回波信号数据长度  $K$ ,匹配滤波信号  $h_m(n)$  长度  $M$ ,取  $K + M$  的最接近的  $2^N$  作为运算长度,回波信号和匹配滤波信号的长度应该分别补零处理来满足运算长度需要。为了降低脉压后输出脉冲的旁瓣电平,必须对匹配滤波器的幅频特性进行适当的加权,常用的加权函数有三角窗、道尔夫-切比雪夫、泰勒函数、汉明加权函数等,在仿真中可根据

具体应用场景、具体要求来选择某一最佳加权函数。

用  $h_m(n)$  作为匹配滤波信号得到的是理想系统,即不可实现系统,可实现系统要进行延迟处理,即对理想匹配滤波输出  $y'(n)$  做延迟处理  $n_0$  个点,其中  $n_0$  为可实现系统的延迟,  $n_0 \geq T_p f_s$ ,可以得到可实现匹配滤波器信号输出表达式:

$$y(n) = y'(n) \otimes \delta(n - n_0) \quad (8)$$

用 FFT 和 IFFT 实现匹配滤波处理时存在循环卷积,即  $n < n_0$  的信号点被循环移动到尾部,因此变为可实现系统时要循环延迟,应该把理想滤波器输出信号的尾部  $n_0$  个信号点平移到输出信号的前端,即雷达接收脉冲的后沿出现峰值,达到信噪比最大。

### 2.2 多波束雷达信号数字仿真

采用雷达近程监视情况下的波形安排,发射  $n$  波束的信号捷变频增量  $\omega_n$  为 100kHz,单个波束带宽 100kHz,脉宽  $300\mu\text{s}$ ,间隔延迟  $100\mu\text{s}$ ,连续三脉冲,周期 12ms,3 个脉冲的探测能力分别为:第一个脉冲  $1755\text{km} > R > 165\text{km}$ ;第二个脉冲  $1695\text{km} > R > 105\text{km}$ ;第三个脉冲  $1635\text{km} > R > 45\text{km}$ 。

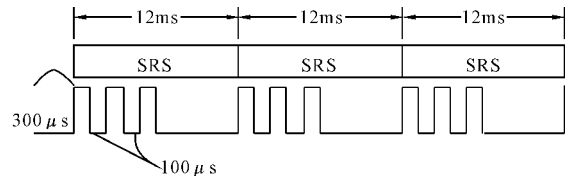


图 2 近程搜索信号形式

测试多波束发射和接收之间的相互接收和目标出现在不同波束,设定两目标距离 5km,目标速度为零,阵面极坐标系位置如表 1 所示。阵面极坐标系波束指向如表 2 所示。

表 1 阵面极坐标系下目标设置位置

	距离/km	俯仰角/(°)	方位角/(°)
目标 1	919.37	16.990	4.232
目标 2	924.37	17.125	9.675

表 2 阵面极坐标系下波束指向

	俯仰角 $\varphi$ /(°)	方位角 $\theta$ /(°)
波束 1	16.960	2.399
波束 2	17.095	7.842
波束 3	17.369	13.162

根据表 1 和表 2 的波束指向和目标位置信

息,仿真多波束信号及其目标测量情况。文献 [4]用线性插值的办法产生不同波束指向的天线方向图,根据目标产生模型产生目标回波,并匹配滤波接收,根据测角和测距模型得到目标测量值如表 3。

表 3 阵面极坐标系下波束测量目标位置

波束	目标 1			目标 2		
	距离/ km	俯仰角 $\varphi/(^\circ)$	方位角 $\theta/(^\circ)$	距离/ km	俯仰角 $\varphi/(^\circ)$	方位角 $\theta/(^\circ)$
1	919.37	16.96	2.85			
2	919.36	16.80	7.04	924.33	17.24	8.88
3				924.32	17.04	11.61

利用文献[5]地基相控阵雷达天线扫描空间分析的有关空域坐标转换公式,得到搜索三波束波束指向与目标探测示意图,如图 3 所示。图 4 给出了该搜索三波束对两目标探测的三波束目标回波和三波束分别匹配滤波输出结果,其中图 4(a)显示目标回波波形(不加接收机噪声),表明三波束发射接收情况下,任一个波束都能接收到其它波束发射的信号,只是幅度大小不同而已,不同发射波束信号频率间隔差 100kHz,因为信号带宽为 100kHz,所以匹配滤波后不同波束信号之间相互无影响;图 4(b)目标回波加接收机噪声信号滤波输出。可以看到波束 1 探测到目标 1,波束 3 探测到目标 2,而波束 2 同时探测到目标 1 和目标 2,这样就存在单个目标被多次探测的情况,出现目标冗余,应该用轨道关联办法剔除冗余。多波束信号仿真体现了多波束的目标测量特点。

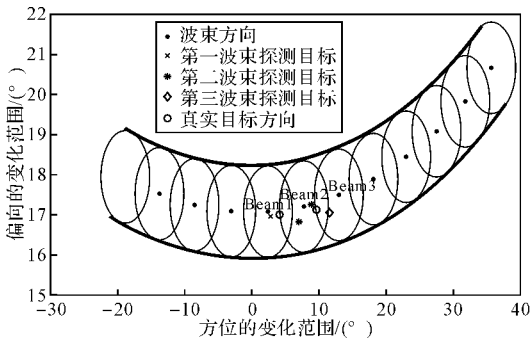
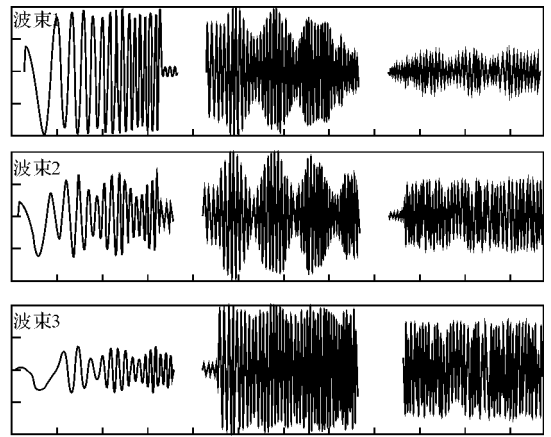


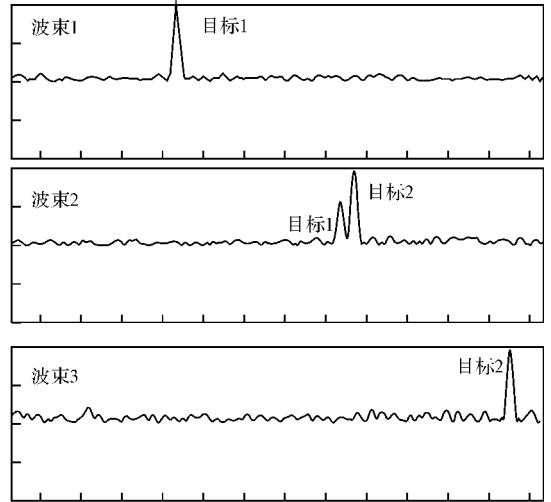
图 3 搜索三波束波束指向与目标探测示意图

### 3 结束语

通过讨论相控阵雷达中的分时串行多波束发射和并行多波束接收问题,得到了多波束线性调频脉冲信号的回波信号模型和接收机模型,并



(a) 三波束两目标雷达回波



(b) 雷达回波匹配滤波输出

图 4 搜索三波束两目标探测仿真

以分时串行三波束雷达信号为例,进行了多波束雷达回波信号的仿真,仿真结果体现了同一目标出现在不同波束的情况,冗余目标需要在数据处理中进一步分析和剔除。相参数字视频信号仿真证明了多波束信号模型和相关分析,再现了多波束信号的处理过程。

参考文献:

- [1] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
- [2] 王国玉,肖顺平,汪连栋. 电子系统建模仿真与评估[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2000.
- [3] 范玉芳,梁甸农. 子脉冲线性调频步进雷达信号分析[J]. 信号处理,2001,17(4):318-321.
- [4] 李永祯,王雪松,罗佳,等. 相控阵天线的建模与实时模拟[C]// 南京:2003年相控阵天线会议,2003.
- [5] 李文臣,刘付兵,袁翔宇,等. 地基相控阵雷达天线扫描空间分析[J]. 雷达科学与技术,2004,2(5):309-314.