

## 双通道脉间变频外场 RCS 测试雷达的研究

彭刚 田进军 王振荣

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

**摘要** 该文研究了双通道脉间变频外场 RCS 测试雷达的设计方法,提出了一种波形设计和系统实现的途径。分析了目标像的失真与频率的数值关系。根据双通道雷达可以同时 2 个频段上进行测试的特点,提出了一种根据测试数据推算目标径向速度的方法,从而能够进一步校正被测目标速度对成像的影响。使用该方法对外场实测数据进行了处理,处理后的目标像幅度有所提高,主瓣变窄,从而分辨率得到了提高。

**关键词** 双通道雷达,脉间变频,校正目标速度影响

中图分类号: TN959.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1582-04

## Research on Two-Channels Pulse to Pulse Frequency Shifting Outdoor RCS Measurement Radar

Peng Gang Tian Jin-jun Wang Zhen-rong

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract** Design of two-channels high-range-resolution pulse to pulse frequency shifting RCS outdoor measurement radar is researched. A waveform design and a system realization method are presented. The numerical relationship between range-profile's distortion and frequency is analyzed. A method to calculate the target's radial velocity by the measurement results is discussed based on the architecture that the radar can measure the target on two different frequency band at the same time. The target's radial velocity effect on range profile can be corrected. The method is used to process the real outdoor measured data. The amplitude of the target's imaging is boosted and the major lobe of the target's imaging become narrower after being corrected.

**Key words** Two-channels radar, Pulse to pulse frequency shifting, Correction of target's velocity effect

### 1 引言

外场 RCS 测量时,由于目标距离较远,大多采用脉冲体制的雷达,参考文献[1,2]中介绍了脉间变频格式实现距离向高分辨的成像原理。但是脉间变频格式的雷达对目标径向速度的影响非常敏感,径向速度会造成目标像的移动和发散,降低 RCS 的测量精度。本文提出了一种双通道的脉间变频格式 RCS 测试雷达的设计方法,能够同时工作在两个不同的频段上,相当于两部不同频段的雷达同时工作,测量效率提高了一倍,并将其工程实现。针对这种雷达的特点,提出一种校正目标径向速度影响的方法,并用该方法对实测结果进行了处理,给出了实验结果。

### 2 双通道脉间变频格式 RCS 测试雷达的设计

外场 RCS 测量的距离  $R$  通常有几千米到十几千米,对于脉冲体制的雷达,为了满足距离上的不模糊,要求脉冲发射周期  $T$  满足  $T \geq 2R/c$ 。而被测目标的最大尺寸  $L_{\max}$  往往远

小于目标距离  $R$ ,即使在满足目标回波准稳态响应的情况下发射信号脉冲宽度也远小于脉冲周期,即发射脉冲信号具有较小的占空比。利用这一特点设计双通道雷达的信号波形如图 1 所示。 $x(t)$  为发射信号,发射两组共  $2N$  个脉冲信号,其载频分别为

$$f_0, F_0, f_1 = f_0 + \Delta f, F_1 = F_0 + \Delta F, \dots, \\ f_{N-1} = f_0 + (N-1)\Delta f, F_{N-1} = F_0 + (N-1)\Delta F$$

每一个周期内发射载波频率分别为  $f_i$  和  $F_i$  的两个脉冲调制信号。回波信号为  $y(t)$ ,其对应于发射信号的延迟  $\tau$  由被测目标的距离  $R$  决定  $\tau = 2R/c$ 。不同频段的回波信号其延迟时间是相同的,可以相应地在接收端生成两组距离门信号对两个频段的回波信号分别进行截取,消除目标范围以外的背景杂波的影响。同时本地产生两组参考信号,分别对应于两个频段的发射信号。

系统实现原理框图如图 2 所示。可变本振模块产生两个波段的各两路本振信号,每个波段的各两路本振信号之间相差一个中频。4 路本振与跳频源混频后得到频率步进信号,其中两路经过预处理及脉冲调制后再通过合路器合成为发射

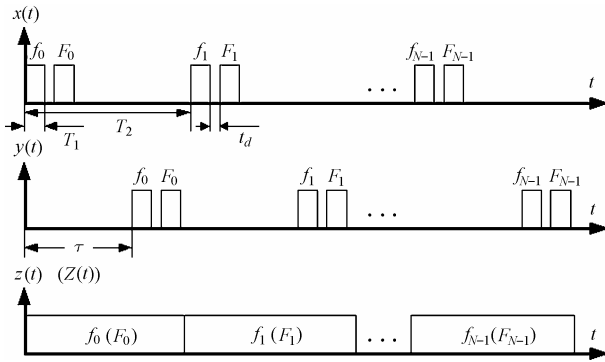


图1 双通道发射信号波形

Fig.1 Two-channels radar transmitted signal waveform

信号  $x(t)$ , 另外两路作为本地参考信号。回波信号  $y(t)$  经过距离门截取后再通过双工器分到两个频段通道上, 在各自的频段上进行正交解调和采样。跳频源可以产生宽带的快速跳频信号, 通过调整可变本振模块输出的本振频率和宽带 YIG 滤波器的通带位置, 可以在 8~18GHz 频率范围的任意两个 500MHz 波段内进行双通道 RCS 测量。将双通道雷达的设计方法进行再次扩展就能实现更多通道的雷达。

### 3 对目标径向速度影响进行补偿的方法

脉间变频格式雷达由于脉冲串相参的时间较长, 目标径向速度对成像有较大的影响。第  $i$  个发射脉冲回波信号的解调输出为

$$G_i = A_i(\cos\psi_i + j \sin\psi_i) = A_i \exp(j\psi_i) \quad (1)$$

假设点目标的距离为  $R$ , 相对于雷达的径向速度为  $v_r$ , 采样时间相对于发射脉冲的延迟为  $t_s$ , 则式(1)中的相位因子:

$$\begin{aligned} \psi_i &= -2\pi f_i \left[ \frac{2R}{c} - \frac{2v_r}{c} (iT_2 + t_s) \right] \\ &= 2\pi f_0 \left( \frac{2v_r t_s}{c} - \frac{2R}{c} \right) - 2\pi i \frac{2R\Delta f}{c} \\ &\quad + 2\pi i \left( \frac{2v_r f_0 T_2}{c} + \frac{2v_r \Delta f t_s}{c} \right) + \frac{4\pi \Delta f v_r T_2}{c} i^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)等号右边第 1 项为常数, 在成像处理时无意义, 第 2 项相当于把目标径向距离与频率相关, 通过成像处理(IDFT)<sup>[1,3]</sup> 得到静止目标的高距离分辨一维像, 第 3 项和第 4 项是目标速度引起的多普勒频移, 其中第 3 项造成目标像偏离静止目标, 第 4 项造成目标像幅度下降、距离向分辨率下降(主瓣展宽)和波形失真<sup>[1,4]</sup>。

假设  $A_i = 1$ , 对回波做成像处理(IDFT)可得:

$$\begin{aligned} H_l &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \exp j \left( \frac{2\pi l i}{N} + \psi_i \right) \\ &= \frac{1}{N} \left[ \exp j 2\pi f_0 \left( \frac{2v_r t_s}{c} - \frac{2R}{c} \right) \right] \\ &\quad \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \exp j \left( \frac{2\pi i y_v}{N} + \frac{4\pi \Delta f v_r T_2}{c} i^2 \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $l$  代表时间(距离)的离散值<sup>[1]</sup>,  $y_v = l - 2NR\Delta f/c + 2Nv_r f_0 T_2/c + 2Nv_r \Delta f t_s/c$ 。如果只考虑径向速度对目标像的移动的影响, 忽略多普勒二次相位项  $4\pi \Delta f v_r T_2 i^2/c$ , 那么利用相控阵天线分析中的恒等式<sup>[1]</sup>:

$$\sum_{p=0}^{\beta-1} e^{+j\alpha p} = \frac{\sin(\beta\alpha/2)}{\sin(\alpha/2)} e^{j(\beta-1)\alpha/2} \quad (4)$$

可以得到:

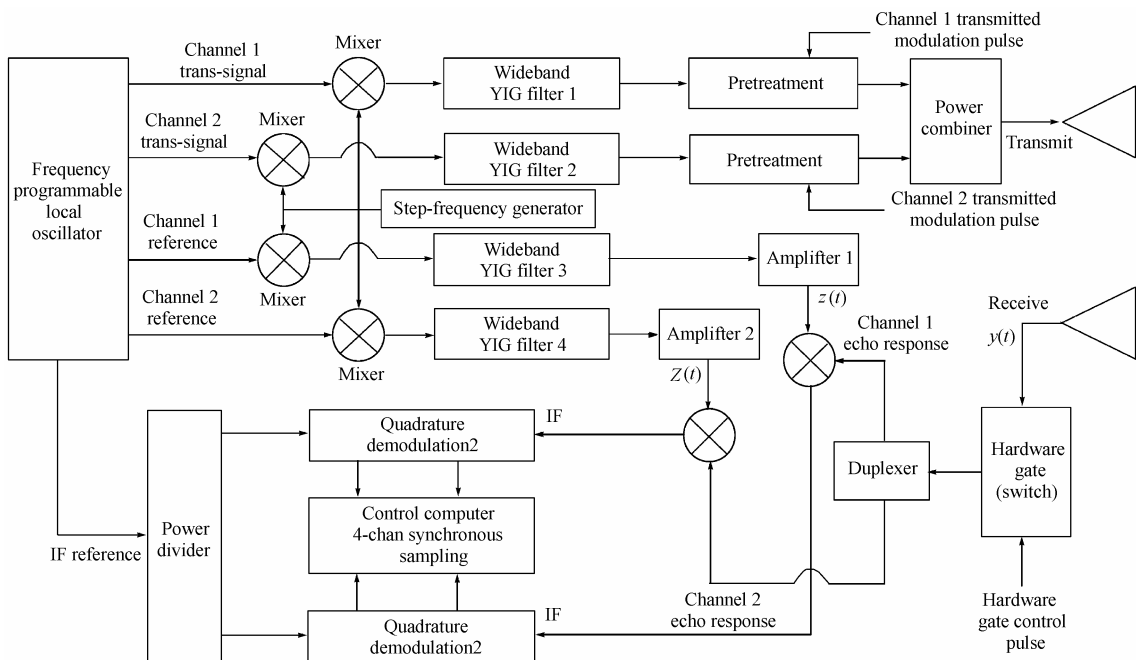


图2 系统实现原理框图

Fig.2 Two-channels radar system functional block diagram

$$H_l = \frac{1}{N} \left[ \exp j2\pi f_0 \left( \frac{2v_t t_s}{c} - \frac{2R}{c} \right) \right] \cdot \frac{\sin \pi y_v}{\sin(\pi y_v / N)} \exp \left( j \frac{N-1}{2} \frac{2\pi y_v}{N} \right) \quad (5)$$

其包络为

$$|H_l| = \left| \frac{\sin \pi y_v}{n \sin(\pi y_v / N)} \right| \quad (6)$$

由式(6)中可以看出, 当  $y_v = 0$  时目标像出现最大点, 即目标像的位置为

$$l_0 = 2NR\Delta f/c - 2Nv_t f_0 T_2/c - 2Nv_t \Delta f t_s/c \quad (7)$$

对比静止点目标的像的位置  $l_0 = 2NR\Delta f/c$ <sup>[2, 5]</sup>可知, 径向速度  $v_t$  造成的目标像的偏移为

$$\Delta l = -2Nv_t f_0 T_2/c - 2Nv_t \Delta f t_s/c \quad (8)$$

从式(8)中可以看出, 在不同频段上对同一个运动目标进行测量时, 对于不同的频率, 目标像有不同的偏移距离。设测试条件为  $R=10\text{km}$ ,  $\Delta f=50\text{kHz}$ ,  $N=6000$ ,  $T_2=75\mu\text{s}$ ,  $t_s=70\mu\text{s}$ , 在  $8\sim 8.3\text{GHz}$ ,  $11\sim 11.3\text{GHz}$ ,  $14\sim 14.3\text{GHz}$ ,  $17\sim 17.3\text{GHz}$ 对成像进行计算机仿真的结果对比如表1所示。

由式(8)可以导出在两个不同频段对同一目标进行测量时, 其目标像位置之差为

$$\Delta l_f = \Delta l_{f_1} - \Delta l_{f_2} = -\frac{2Nv_t T_2}{c} (f_0^1 - f_0^2) = -\frac{2Nv_t T_2 \Delta f_0}{c} \quad (9)$$

$f_0^1$  和  $f_0^2$  是两个频段各自的起始频率。设两个频段一维像上目标像的单程距离之差为  $\Delta R_f = c\Delta l_f / (2B) = c\Delta l_f / (2N\Delta f)$ , 由式(9)可得:

$$v_t = -\frac{c\Delta l_f}{2NT_2\Delta f_0} = -\frac{\Delta R_f \Delta f}{T_2 \Delta f_0} \quad (10)$$

由以上推导可知, 如果我们可以在两个频段上对同一运动目标进行测量, 通过对比两个频段上的目标像位置之差, 根据这两个频段的频率差及其它系统参数, 就可以反推出目标相对于雷达的径向速度  $v_t$ , 从而可以对回波采样信号进行速度补偿处理, 其补偿方法是对回波采样信号乘上一个

相位补偿因子  $\exp j[-2\pi f_i(2v_t/c)(iT_2 + t_s)]$ 。由于径向速度是使整个目标像产生位置偏移, 因此对于复杂目标, 可以选择目标上某个特征强散射源的像为基准进行分析比较, 从而得到目标的总体速度。

第2节中所述的双通道脉间变频RCS测试雷达可以在两个不同的频段对同一目标进行测量, 测量结果可以用上述方法进行速度补偿处理, 从而消除目标径向速度的影响所造成的RCS测量误差。

### 4 系统实现及外场实测结果处理

对第2节中所述的系统进行了工程实现, 对海上某运动船只进行RCS测量, 系统工作在双通道状态, 一个通道工作在X波段  $8.7\sim 9\text{GHz}$ , 另一个通道工作在Ku波段  $12.7\sim 13\text{GHz}$ ,  $\Delta f=50\text{kHz}$ ,  $N=6000$ ,  $T_2=150\mu\text{s}$ ,  $t_s=67.7\mu\text{s}$ 。两个波段测得的数据分别作一维成像处理, 一维像上目标特征点的位置分别为  $7579.7\text{m}$  和  $7557.8\text{m}$ 。由式(10)可以算出目标相对于雷达的径向速度  $v_t=1.817\text{m/s}$ 。对回波信号采样进行速度补偿处理, 补偿前后的目标一维像对比如图3, 图4所示。补偿前后目标像特征目标点的一些具体数据对比如表2所示。

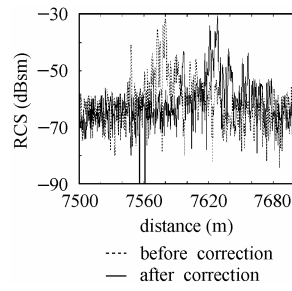


图3 补偿前后 X 波段一维像对比  
Fig.3 Comparison between target's one-dimensional origin-imaging and corrected-imaging in X band

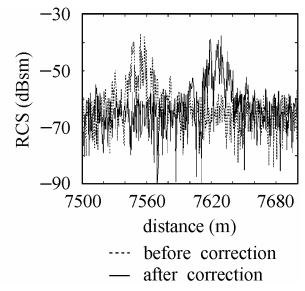


图4 补偿前后 Ku 波段一维像对比  
Fig.4 Comparison between one-dimensional target's origin-imaging and corrected-imaging in Ku band

表1 不同频段运动点目标像位置对比

成像频段(GHz)		8~8.3	11~11.3	14~14.3	17~17.3
目标像位置(m)	$v_t = 0\text{ m/s}$	10000	10000	10000	10000
	$v_t = 20\text{ m/s}$	9760	9670	9580	9490
目标像偏移 $\Delta l$ (m)		240	330	420	510

表2 目标像特征目标点数据对比

目标像特征点的属性	X 波段 8.7~9GHz		Ku 波段 12.7~13GHz	
	速度补偿前	速度补偿后	速度补偿前	速度补偿后
位置(m)	7579.7	7628.3	7557.8	7629
幅度(dBsm)	-31.8	-30.69	-37.59	-37.22
主瓣-3dB 宽度(m)	1.2	0.7	0.73	0.6

从表 2 中可以看出, 补偿后的目标像幅度提高, 主瓣变窄, 从而分辨率得到了提高, 效果明显。如果被测目标的速度更快, 那么速度补偿的效果将更加显著。

对目标像进行 RCS 计算, 发现补偿前后目标的 RCS 值相差不大, 说明当目标的径向速度较小时, 虽然一维像的位置和分辨率受到影响, 但是对测量的 RCS 值的影响不大。

## 5 结束语

双通道(多通道)的脉间变频格式外场 RCS 测试雷达能够大大地提高测试效率, 减少了测试时间, 这对提高外场 RCS 测量的快速性、保密性以及降低测试成本有重要意义。并且根据双通道测试雷达能够同时在两个频段上对目标进行测量的特点, 通过对比分析不同频段上的测量数据, 能够对目标径向速度进行较好的补偿, 从而提高了一维分辨和 RCS 的测量精度。

## 参 考 文 献

[1] Wehner Donald R. High Resolution Radar[M]. Norwood: Artech

House, 1987, chapter 5, 7.

- [2] 王振荣, 文宏武. 脉间变频格式高距离向分辨力成像方法中系统误差的研究[J]. 电子学报, 1995, 23(12): 82 – 85.
- [3] Mensa Dean L. High Resolution Radar Imaging[M]. Norwood: Artech House, 1981, chapter 2, 5.
- [4] Gill G S. Step frequency waveform design and processing for detection of moving targets in clutter[J]. Radar Conference, 1995, Record of the IEEE 1995 International: 573 – 578.
- [5] 毛二可, 龙腾, 韩月秋. 频率步进雷达数字信号处理[J]. 航空学报, 2001, 22(增刊): 16 – 25.

彭 刚: 男, 1978 年生, 博士生, 从事 RCS 测试系统和射频仿真方面的研究.

田进军: 男, 1981 年生, 博士生, 从事 RCS 测试系统和电路设计方面的研究.

王振荣: 男, 1941 年生, 教授, 博士生导师, 从事微波测量系统、微波成像技术和射频仿真等领域的研究.