

频率步进信号的合成孔径雷达处理

李海英, 杨汝良

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

摘要: 合成孔径雷达借助综合孔径原理来提高方位分辨率, 而距离分辨率的提高则需借助于脉冲压缩技术. 频率步进波形是通过发射载频步进变化的子脉冲串来合成大带宽信号, 从而获得高距离分辨率. 若将频率步进波形应用于合成孔径雷达, 则可获得距离和方位的二维高分辨率. 本文首先分析了径向速度对频率步进雷达一维距离像的影响, 然后建立频率步进信号照射下的合成孔径雷达回波模型, 提出频率步进波形设计原则, 给出频率步进合成孔径雷达的成像步骤.

关键词: 合成孔径雷达; 脉间频率步进波形; 合成带宽; 合成距离像; 距离分辨率

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 03-0349-04

Stepped-Frequency Synthetic Aperture Radar Imaging

LI Hai-ying, YANG Ru-liang

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: SAR obtains high azimuth resolution through synthetic aperture integration and high range resolution via pulse compression. Stepped-frequency waveform achieves large bandwidth by sequentially changing carrier frequency over pulses. In order to obtain high resolution in two dimensions, we try to apply stepped-frequency waveform to SAR system. First, the effect of radial velocity on synthetic range profile is discussed, then the return of stepped-frequency SAR is presented. Furthermore, the waveform design is discussed, and the method of SAR imaging is given.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); stepped-frequency waveform; synthetic bandwidth; range resolution; synthetic range profile; azimuth resolution

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率成像雷达,它采用综合孔径原理提高雷达的角分辨率,而距离向分辨率的提高则需借助于脉冲压缩技术^[2].由于雷达的距离分辨率与信号的带宽成反比,若想获得距离向的高分辨率,就要求大的信号带宽.瞬时带宽的增加必将提升系统对硬件的要求,在现有的硬件水平约束下,脉间频率步进波形是一种工程实用、方便灵活的高距离分辨率信号形式.

脉间频率步进波形是一组载频以固定频率增量变化的单频脉冲串,它取消了对接收机瞬时带宽和反射信号近似稳定的高采样率要求,避免了某些脉冲压缩波形的实际设计问题^[3].它的另一个优势是能跳过那些受调频广播和移动通讯等外界干扰的频率,具有抗干扰性^[4].但该波形对径向速度非常敏感,雷达与目标间的径向运动造成距离像分辨率下降、测距精度降低和信噪比损失^[5],而SAR则正是利用雷达与目标之间的相对运动来提高方位分辨率,可见径向运动对合成孔径雷达距离和方位向的影响互相制衡,同时径向速度分量又

造成距离与方位向的耦合.

文献[6]提出了一种多普勒效应补偿技术来消除距离向多普勒二次相位和距离方位向耦合,前提是假设载机相对于目标的径向速度分量在合成孔径时间内不变.但实际上脉冲串间的径向速度分量是变化的,与雷达与目标的方位向交角有关,所以该方法不能完全补偿距离方位向耦合.文献[7]建立了频率步进信号的SAR回波模型,但其混频参考信号的初始相位随时间变化,无法给出目标间的真正相对位置,造成目标距离像的失真.本文首先从一维距离像的影响,然后分析频率步进信号照射下合成孔径雷达的二维成像原理,提出用于合成孔径雷达的频率步进波形设计原则,给出频率步进合成孔径雷达成像的具体步骤,并通过仿真实验验证.

2 径向速度对目标一维距离像的影响与速度补偿

对于具有 N 个子脉冲的频率步进波形而言,正交混频器输出的采样信号为^[3]:

$$G_i = A_i e^{j\phi_i} = A_i e^{-j2f_i(t)}, \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

目标回波延迟:

$$(t) = 2(R_0 - vt)/c \quad (2)$$

其中载频 $f_i = f_0 + i \cdot f$, f_0 为中心频率, f 为步进增量, 信号合成带宽为 $B = N \cdot f$, R_0 为雷达与目标之间的初始距离, 目标径向速度为 v , T_r 为脉冲重复周期, c 为光速.

对于发射的每组脉冲串, 正交混频器输出的信号代表了目标反射率在频率域的采样, 每组中的全部复数采样值经过 IDFT 处理即可形成目标的一维距离像^[2,4]. IDFT 经处理后得到归一化的目标复数距离像为:

$$H(l) = \sum_{i=0}^{N-1} \exp\{j \frac{2}{N} [l - \frac{R_0}{r} + \frac{vT_r f_0}{r f} i + \frac{vT_r i^2}{r}]\} \quad (3)$$

其中 l 为径向距离位置, $l = 0, 1, \dots, N - 1$, $r = c/(2N \cdot f)$ 为距离分辨率. 由于频率步进信号实质上是线性调频信号的离散化形式, 所以可参照线性调频信号瞬时频率的求法, 得出距离像的瞬时频率:

$$f(i) = \frac{1}{N} [l - \frac{R_0}{r} + \frac{vT_r f_0}{f r} + \frac{2vT_r i}{r}] \quad (4)$$

可见: 初始距离 R_0 处静止目标的距离像的峰值位置在 R_0/r ; 径向速度造成距离像偏移静止目标位置 $vT_r f_0/f r$ 个距离单元; 而在 N 个子脉冲时间内将目标响应主瓣展宽 $2vNT_r/r$ 个距离单元^[5]. 由此定义径向速度引起目标距离像的偏移因子 L 和发散因子 P 表达式分别为:

$$L = \frac{vNT_r f_0}{r B} \quad (5)$$

$$P = \frac{2vNT_r}{r} \quad (6)$$

为消除径向速度对目标一维距离像的影响, 定义速度补偿因子:

$$i = \exp[-j4 f_i \frac{vT}{c}] \quad (7)$$

对式(1)中的子脉冲正交混频器输出采样 G_i 乘以相应的速度补偿因子 i , 以消除径向速度对目标距离像的影响, 表达式为:

$$G_{com} = G_i \cdot i = A_i e^{j i} = A \exp[-j2 f_i \frac{2R_0}{c}] \quad (8)$$

可见经过速度补偿后, 正交解调后的输出信号还原为静止目标的正交解调后的基带信号, 从而消除了径向速度对目标一维距离像的影响.

3 频率步进信号照射下的合成孔径雷达成像

以正侧视合成孔径雷达为例, 研究频率步进信号照射下的合成孔径雷达成像处理方法. 取包含载机航线和点目标 P 的斜平面, 取载机前进方向 X 和与之垂直的斜距向 R 建立坐标系, 如图 1 所示.

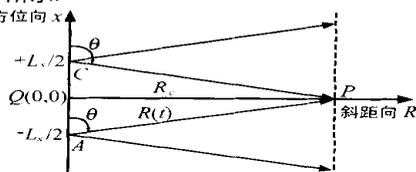


图 1 斜平面内雷达天线方向图

雷达沿航线 X 以速度 V_a 匀速运动, R_c 为点目标 P 到载机航线的垂直距离, 点目标 P 的坐标为 $(R_c, 0)$, 为载机运动方向与雷达和目标连线之间的夹角. T_s 为合成孔径时间, L_s 为合成孔径长度. 当雷达处于起始位置 $A(0, -L_s/2)$ 时, 波束刚刚触及点目标 P , 当雷达处于坐标原点 $Q(0, 0)$ 时, P 点刚好处于波束中心, 当载机运动到位置 $C(0, +L_s/2)$ 时, 波束即将离开点目标^[2].

设雷达发射信号的脉冲重复周期为 T_r , 子脉冲宽度为 T . 在一个合成孔径时间内雷达发射 M 组频率步进脉冲串信号, 每组脉冲串内含有 N 个子脉冲, 发射波形可表示为:

$$x_{ki} = A_{ki} \cos(2 f_i t + \varphi_{ki}), (i + kN) T_r \leq t < (i + kN) T_r + T \quad (9)$$

其中 $k = -M/2, \dots, M/2$ 为脉冲组序号, $i = -N/2, \dots, N/2$ 为脉冲串内的子脉冲序号, A_{ki} 和 φ_{ki} 分别为每个发射脉冲的幅度和初始相位.

接收信号表示为:

$$y_{ki} = B_{ki} \cos[2 f_i [t - (t) + \varphi_{ki}], (i + kN) T_r \leq t < (i + kN) T_r + T \quad (10)$$

其中 $(t) = 2R(t)/c = 2 \sqrt{R_c^2 + (V_a t)^2}/c$. 一般地, 合成孔径雷达的斜距总要比合成孔径长度大很多, 在此条件下, 有菲涅耳近似^[2]:

$$(t) = 2[R_c/c + (V_a t)^2/2R_c c] \quad (11)$$

参考信号为:

$$z_{ki} = A_{ki} \cos(2 f_i t + \varphi_{ki}), (i + kN) T_r \leq t < (i + kN) T_r + T \quad (12)$$

则回波信号与参考信号混频后得到的基带信号为:

$$m_{ki} = C_{ki} \cos[-2 f_i (t) + \varphi_{ki}], (i + kN) T_r \leq t < (i + kN) T_r + T \quad (13)$$

将式(11)表示的回波延迟带入上式, 得到混频器输出的相位为^[6,7]:

$$\begin{aligned} \varphi_{ki} = & -2 f_c \frac{2R_c}{c} - 2 i f \frac{2R_c}{c} - 2 f_c \frac{(V_a t)^2}{cR_c} - 2 i f \frac{(V_a t)^2}{cR_c} \\ & - 2 f_c \frac{(V_a T_r)^2 2kNi}{cR_c} - 2 i f \frac{(V_a T_r)^2 2kNi}{cR_c} \\ & - 2 i f \frac{(V_a kNT_r)^2}{cR_c} - 2 f_c \frac{(V_a kNT_r)^2}{cR_c} \end{aligned} \quad (14)$$

其中第一相位项为常数, 在二维处理时无实际意义; 第二相位项为距离像高分辨处理时必需的相位; 第三和第四相位项是每组脉冲串内雷达与目标间的径向运动带来的相位, 将造成距离像的偏移和展宽, 该项可通过选择合适的波形参数将其控制在一定范围内; 第五、第六、第七相位项为脉冲组序列 k 和子脉冲序列 i 的耦合项, 它造成距离像进一步偏移和展宽, 同时使方位向匹配滤波器失配, 导致整个合成孔径雷达图像严重失真; 第八项为脉冲组序列 k 的二次项, 是方位向脉冲压缩所必需的相位项.

对频率步进合成孔径雷达来说, 为保证距离向的高分辨率距离像不受雷达与目标之间的径向速度分量的影响, 可以通过选取合理的波形参数将径向速度引起的距离像平移展宽限制在允许范围内; 为保证方位向的脉冲压缩, 必须考虑 SAR 系统本身的距离徙动问题. 对机载合成孔径雷达而言, 可由加速度计测得的载机速度、惯性导航提供的飞行高度、雷达俯仰

角与雷达方位向偏角及步进调频源、定时参数联合确定耦合补偿因子,以消除距离向多普勒多次相位和距离方位向耦合。耦合补偿因子表达式为:

$$\mu_{ki} = \exp \left[2 f_c \frac{(V_a T_r)^2 2 k N i}{c R_c} + 2 i f \frac{(V_a T_r)^2 2 k N i}{c R_c} + 2 i f \frac{(V_a k N T_r)^2}{c R_c} \right] \quad (15)$$

将每个子脉冲混频输出信号乘以耦合补偿因子,即:

$$g_{ki} = m_{ki} \cdot \mu_{ki} \quad (16)$$

通过选择合适的波形参数,可忽略式(14)中第三、四相位项。再经耦合补偿后,式(14)中的回波相位简化为

$$k_i = -2 f_c \frac{2 R_c}{c} - 2 i f \frac{2 R_c}{c} - 2 f_c \frac{(V_a k N T_r)^2}{c R_c} \quad (17)$$

这是 SAR 二维处理所需要的相位。下面将探讨合成孔径雷达频率步进波形的参数设计,并研究频率步进合成孔径雷达的成像问题。

4 合成孔径雷达频率步进信号参数设计

频率步进波形设计首先应已知:发射信号的中心频率、载机飞行速度、目标与雷达航迹的垂直距离和最大斜距,系统所要达到的距离和方位分辨率,然后确定天线长度、信号总带宽、脉冲重复频率等参数。频率步进波形设计的关键是确定频率步进数、子脉冲宽度和频率步进增量,下面给出波形参数选择的方法^[2,3,5,8]:

(1) PRF 选择。首先由 SAR 与成像目标的几何关系确定雷达与目标间最大径向速度 V_{max} 和最小径向速度 V_{min} 。由图 1 可知,载机的运动速度在雷达和目标连线方向上的径向速度分量为 $V_a \cos \theta$,则雷达在合成孔径起始点 A 和结束点 C 时目标径向速度绝对值最大,坐标原点处径向速度为零。根据文献[8]可得 PRF 上下限:

$$2[V_{max} + V_{min}] / \text{PRF} \leq c / (2 R_{max}) \quad (18)$$

(2) 频率步进数 N 和频率步进增量 f 。由 2 节的分析可知由径向速度 v 造成的距离像的偏移和展宽为:

$$L + P = \frac{2 V N T_r}{c} (f_c + 2 B) \quad (19)$$

为保证高分辨 SAR 成像要求,距离像偏移和展宽量要求不超过一个距离分辨单元,则步进阶数 N 应满足:

$$N < \frac{c \times \text{PRF}}{2 V_{max} (f_c + 2 B)} \quad (20)$$

为便于距离向 IFFT 处理, N 一般取 2 的整数次幂,则频率步进增量:

$$f = B / N \quad (21)$$

(3) 子脉冲宽度 T 。脉冲宽度一般取频率步进增量的倒数。

$$T = 1 / f \quad (22)$$

(4) 脉冲串组数 M 。由雷达脉冲重复频率、合成孔径时间和频率步进数可确定在一个合成孔径时间内雷达要发射频率步进脉冲组数:

$$M = \text{PRF} \times T_s / N \quad (23)$$

5 仿真实验

已知:载机飞行速度 $V_a = 100 \text{ m/s}$,点目标到载机航线的垂直距离 $R_c = 5 \text{ km}$,信号中心频率 $f_c = 2 \text{ GHz}$,要求距离分辨率为 0.3 m 。根据第 4 节中介绍的设计方法计算确定波形参数如下:

- (1) 脉冲重复频率: $\text{PRF} = 30 \text{ kHz}$;
- (2) 合成孔径时间: $T_s = 3.75 \text{ s}$;
- (3) 径向速度: $V_{max} = 3.75 \text{ m/s}$, $V_{min} = 0 \text{ m/s}$;
- (4) 脉冲串内子脉冲个数: $N = 256$;
- (5) 频率步进增量: $f = 2 \text{ MHz}$;
- (6) 子脉冲宽度: $T = 0.5 \mu\text{s}$;
- (7) 脉冲串个数: $M = 256$ 。

实验 1 点目标回波直接成像

未经耦合补偿的点目标合成孔径处理后的三维侧视图见图 2,目标响应峰值点处的距离向和方位向剖面曲线见图 3。

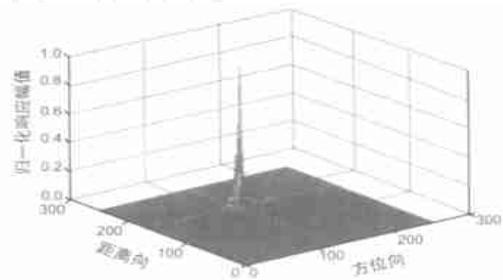


图 2 未经耦合补偿的点目标三维侧视图

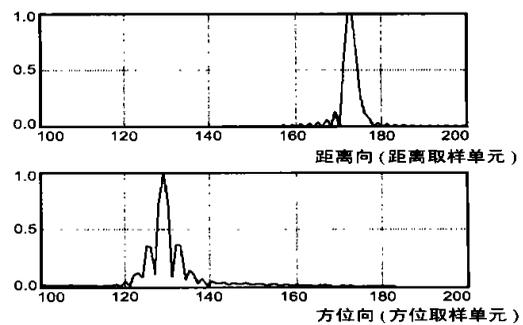


图 3 未经耦合补偿的峰值点距离、方位剖面图

由图 2 可见,点目标的二维脉压结果为非理想的 sinc 函数形状,响应主瓣明显展宽。由未经耦合补偿的距离方位向剖面图 3 计算得出距离向峰值响应主瓣宽度为 0.5859 ,是系统要求分辨率的近 2 倍,而且方位向第一旁瓣电平高达

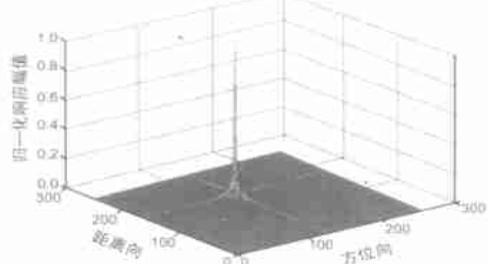


图 4 耦合补偿处理后的点目标三维侧视图

- 8.8739dB; 方位向匹配滤波器已严重失配, 因此必须补偿回波中的距离方位耦合。

实验 2 耦合补偿实验

对每个发射子脉冲的回波信号, 乘以耦合补偿因子, 即可消除图 2 中的距离方位耦合^[3]。

补偿后的点目标三维侧视图 4 可见, 输出响应具有很好 sinc 的函数型包络, 基本消除了距离方位耦合。从距离方位剖面图 5 中可以看出, 距离向主瓣变窄, 主瓣的 3dB 宽度为 0.2930, 与理论计算的分辨率吻合; 方位向旁瓣幅值明显下降, 第一旁瓣约为 -13.1279dB, 近似等于 -13.2dB^[6]。可见耦合补偿使距离和方位分辨率都得以恢复, 补偿效果理想。

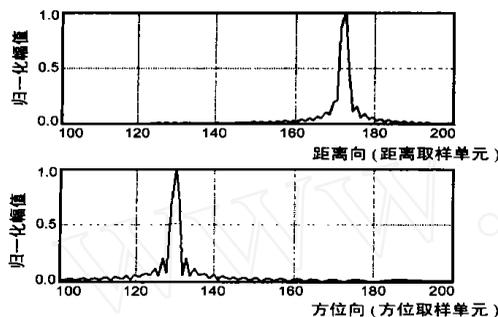


图 5 耦合补偿后的峰值点距离、方位剖面图

6 结束语

本文利用频率步进波形在不增加系统瞬时带宽的条件下获得大的有效带宽, 分析了频率步进信号的距离向处理和频率步进 SAR 原理, 提出了应用于 SAR 的频率步进波形设计原则和频率步进信号照射下的 SAR 成像方法。通过点目标的模拟, 获得了高分辨率的二维 SAR 图像。本文研究证明: 将空间域的综合孔径和时间域的频率步进相结合获得高分辨率 SAR 图像的方法是切实可行的。

参考文献:

[1] 张直中. 合成孔径雷达遥感技术及其应用[J]. 火控雷达, 2000.

29(1): 1 - 7.

- [2] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 38 - 42.
- [3] D R Wehner. High Resolution Radar (2nd ed) [M]. London: Artech House, 1994. Chapter 5.
- [4] R T Lord, M R Inggs. High resolution VHF SAR processing using synthetic range profiling [A]. Proc IEEE Geoscience Remote Sensing Symp., IGARSS '96 [C]. Lincoln, Nebraska: IEEE, 1996. 1. 454 - 456.
- [5] G S Gill. Step frequency waveform design and processing for detection of moving targets in clutter [A]. IEEE International Radar Conference [C]. USA: IEEE, 1995. 573 - 578.
- [6] 安建平, 张润宁, 白克壮. 应用于 SAR 的一种波形及多普勒效应补偿技术 [J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(1): 59 - 62.
- [7] Yonghong Huang, Zoumin Ma, Shiyi Mao. Stepped-frequency SAR system Design and signal processing [A]. EUSAR '96 [C]. Konigswinter, Germany: EUSAR 96, 1996. 565 - 568.
- [8] G S Gill, Paulo A Soarcs. Step Frequency High PRF Waveform Design [D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 1996. 15 - 22.

作者简介:



李海英 女, 1974 年生于吉林省蛟河县, 中科院电子所通信与信息系统专业博士研究生, 主要研究方向为超宽带信号设计与超宽带合成孔径雷达成像技术。



杨汝良 男, 1943 年生于云南省昆明市, 研究员, 博士生导师, 三十多年来从事航空航天电子系统工程研究与研制工作, 现为中国科学院联合遥感中心理事, 中国通讯学会无线通信委员会委员, 中国航空学会雷达与制导专业委员会委员, 中国科学院电子所成像雷达系统部主任, 中国电子学会高级会员。