

动目标合成孔径雷达成像的二次相位匹配滤波法¹

何峻湘 李景文 周荫清
(北京航空航天大学 北京 100083)

摘 要 本文针对合成孔径雷达运动目标回波的特点, 引入多普勒调频率匹配滤波方法, 解决由于运动目标成像二次相位失配而引起的方位散焦问题, 提出了一种适合快速处理的高线式的匹配矩阵结构, 计算机模拟得到运动目标聚焦良好的图象。

关键词 合成孔径雷达, 运动目标成像, 多普勒调频率, 匹配滤波法

中图分类号 TN951, TN713

1 引 言

合成孔径雷达 (SAR) 是一种现代高分辨率成像雷达, 它将合成孔径技术、脉冲压缩技术和数字信号处理有机地结合运用, 得到两个方向上的高分辨率地面图象——通过发射宽带调频信号和脉压技术获得距离向的高分辨率、通过较短的天线尺寸和载体的规则运动以及先进的信号处理方法获得方位向的高分辨率。

在许多使用合成孔径雷达的成像应用中, 特别是在战地进行实时监测、预警、实时跟踪时, 人们并不满足于仅得到地面静止目标场景, 希望能够检测运动的目标并尽可能产生聚焦的图象, 产生所谓的静止、运动目标成像叠加图。然而, 运动的目标通常不易检测, 其产生的图象在常规 SAR 的图象中是模糊的, 并且不能相对于固定的地面背景定位, 给辨识带来很大困难。这是由 SAR 图象的形成方法直接引起的。SAR 利用雷达与地面场景之间的相对运动, 通过信号处理和运动补偿可以获得很高的方位分辨率。但目标以不可预测的方式运动时, 则这种成像方法就不能正常工作, 从而引起散焦、模糊和方位偏移^[1]。

本文在分析机载 SAR 运动目标回波信号特点的基础上, 引入了一种动目标成像的调频率匹配滤波方法, 用以解决由于二次相位失配引起的方位散焦问题, 提出了一种有利于实时处理的多普勒调频率匹配矩阵数据结构, 可节省运算量的开支。

2 动目标合成孔径雷达回波分析

机载雷达与目标间的相对运动产生了回波信号相位的变化, 它可以通过相对运动的距离历程来表示, 设载机匀速直线飞行, 得到

$$R(t) \approx R_0 + V_r t + [(V_a - V_c)^2 + R_0 a_r] \frac{t^2}{2R_0}, \quad t \in T, \quad (1)$$

¹ 1994-04-07 收到, 1994-08-29 定稿
863-308 高科技资助项目

其中 R_0 表示 $t = 0$ 时刻的雷达与目标之间的斜距; V_r 和 V_c 分别表示目标沿距离向的速度在斜距上的投影和沿方位向的速度; a_r 和 a_c 分别表示目标沿距离向的加速度在斜距上的投影和沿方位向的加速度; V_a 表示载机平台速度; T 表示天线照射有效时间。

相位历程为 $\phi(t) = (4\pi/\lambda)R(t)$, 显然, 雷达发送的脉冲, 经过地面背景和运动目标反射后, 接收信号是一个具有二次相位调制的线性调频信号, 其参数 f_c 和 f_r 取决于运动目标。

$$f_c = 2V_r/\lambda, \quad f_r = 2[(V_a - V_c)^2 + R_0 a_r]/(\lambda R_0). \quad (2)$$

观察 (2) 式, 可以知道正是由于 V_r 的存在, 引起了动目标成象在 SAR 图象中的距离模糊、方位偏移现象^[1], 解决问题的一种方法可以采用多普勒中心频率的前置滤波方法, 它不属于本文研究的重点, 详情参见参考文献 [2, 3]。

要获得高方位分辨率, 就得去线性调频, 消除回波信号中二次相位 (f_r) 的影响, 再对剩下的信号作 FFT 变换。其中去线性调频过程中最关键的是参考函数的选择。在一般 SAR 成象处理中, 参考函数是地面点目标回波的复制。当接收信号与参考函数混频处理后, 就消除了二次相位项, 使得来自固定点目标的信号变成正弦信号。由于运动目标的不可预测性, 只要有方位向速度 V_c 存在, 致使它的回波的线性调频率不同于来自固定目标的回波的线性调频率, 与参考函数混频后, 二次相位项得不到匹配和消除, 仍为一线性调频信号, 只不过斜率有所变化 (增大或减小)。如果在混频以后进行 FFT 变换, 相当于使信号通过一个等距分布的滤波器组, 固定目标回波的影响在多普勒分辨范围内被分隔, 但来自运动目标的信号没有得到滤除, 将对几个滤波器产生影响, 从而引起图象在方位维出现散焦。

3 二次相位去除的调频率匹配滤波方法

3.1 调频率滤波器的引入

在传统的多普勒滤波处理中, 滤波器组可以等效地由 FFT 来完成, 每一个滤波器匹配一特定频率, 其间隔由频率分辨率决定。例如具有 N 个系数的频率中心 f_c 的数字滤波器的传递函数定义为

$$H(f) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n \exp[j2\pi(f_c - f)nT]. \quad (3)$$

为了达到一定的峰值 - 旁瓣比, 可适当选择 c_n 的取值, T 为采样间隔。

将这种滤波方法推广至调频率滤波, 即定义一个系统传递函数, 使其中心斜率为 f_r , 它具有如下形式:

$$H(\mu) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n \exp[j2\pi(f_r - \mu)n^2 T^2]. \quad (4)$$

若令 $\gamma = (f_r - \mu)T^2$, 则 (4) 式可写成 γ 的函数形式。

$$H(\gamma) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n \exp[j\pi\gamma n^2]. \quad (5)$$

通过实验, 可知 $|H(\gamma)|$ 的 3dB 分辨率与 NT 的平方成反比关系。从而可以根据要求来设置调频率滤波器组, 满足斜率匹配的要求。

3.2 调频率滤波器对信号的匹配

SAR 回波信号经过距离压缩后, 进行方位向处理, 与参考函数混频, 而后经 FFT 滤波处理, 信号可由下式表示:

$$S(n) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \exp[j2\pi f_m nT] + \sum_{k=0}^{K-1} b_k \exp[j2\pi f_k nT] \exp[j\pi \mu n^2 T^2]. \quad (6)$$

考虑 (6) 式, a_m 和 b_k 分别表示静止目标和运动目标后向散射系数回波强度, 如果没有动目标存在, 即 $b_k = 0$, 显然 $S(n)$ 是 N 个正弦波形式之和, 每一个分别对应地面上的一个点。注意到 FFT 的频率分辨率与 NT 成反比, 令 $f_m = m/(NT)$ 及 $f_k = k/(NT)$, 且不失一般性, 令 $M = K = N$ (若 $N > M$ 和 K , 只要令 a_m 和 b_k 的一些值为 0 即可), 得到

$$S(n) = \sum_{m=0}^{N-1} a_m \exp[j2\pi mn/N] + \sum_{m=0}^{N-1} b_m \exp[j2\pi mn/N] / \exp[j\pi \mu n^2 T^2]. \quad (7)$$

对 (7) 式作 FFT 变换, 有

$$S(k) = a_k + \sum_{m=0}^{N-1} b_m \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp[-j2\pi(k-m)n/N] \exp[j\pi \mu n^2 T^2]. \quad (8)$$

显然, 若 $b_m = 0$, $S(K) = a_k$, 正是由于有 b_m 的存在, 使 SAR 图象出现散焦现象。另外, 在 (7) 式两边同乘以 $\exp[-j\pi \mu n^2 T^2]$, 得到

$$S'(n) = \sum_{m=0}^{N-1} a_m \exp[j2\pi mn/N] \exp[-j\pi \mu n^2 T^2] + \sum_{m=0}^{N-1} b_m \exp[j2\pi mn/N]. \quad (9)$$

同样, 对 $S'(n)$ 作 FFT 变换, 有

$$S'(k) = b_k + \sum_{m=0}^{N-1} a_m \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp[-j2\pi(k-m)n/N] \exp[-j\pi \mu n^2 T^2]. \quad (10)$$

观察 (8) 式和 (10) 式, 发现它们有极为相似之处。如果令

$$g_\mu(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp[j2\pi in/N] \exp[j\pi \mu n^2 T^2], \quad (i = 0, 1, \dots, N-1).$$

则 (8) 式和 (10) 式可化简为

$$S(k) = a_k + \sum_{m=0}^{N-1} b_m g_\mu(m-k), \quad (k = 0, 1, \dots, N-1); \quad (11)$$

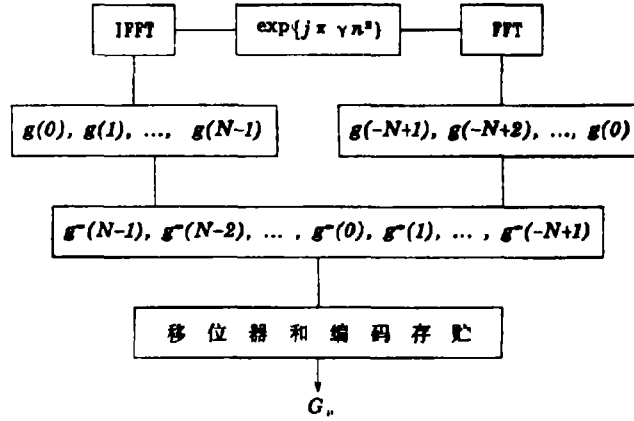


图 1

$$S'(k) = b_k + \sum_{m=0}^{N-1} a_m g_{\mu}^*(k-m), \quad (k=0, 1, \dots, N-1). \quad (12)$$

将 $S(k)$ 和 $S'(k)$ 随 k 变化的数据流写成矩阵形式

$$\bar{S} = [S(0) S(1) \dots S(N-1)]^T = \bar{a} + \bar{G}_{\mu} \cdot \bar{b}, \quad (13a)$$

$$\bar{S}' = [S'(0) S'(1) \dots S'(N-1)]^T = \bar{b} + \bar{G}_{\mu}^H \cdot \bar{a}, \quad (13b)$$

式中

$$\bar{G}_{\mu} = \begin{pmatrix} g_{\mu}(0) & g_{\mu}(1) & \dots & g_{\mu}(N-1) \\ g_{\mu}(-1) & g_{\mu}(0) & \dots & g_{\mu}(N-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{\mu}(1-N) & g_{\mu}(2-N) & \dots & g_{\mu}(0) \end{pmatrix}, \quad \bar{a} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_{N-1} \end{pmatrix}, \quad \bar{b} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_{N-1} \end{pmatrix},$$

其中 H 表示共轭复转置。考虑 \bar{G}_{μ} 矩阵，发现 \bar{G}_{μ} 为酉阵，有重要性质 $\bar{G}_{\mu}^{-1} = \bar{G}_{\mu}^H$ ，应用到 (13) 式，得到

$$\bar{S}' = \bar{b} + \bar{G}_{\mu}^H \cdot \bar{a} = \bar{G}_{\mu}^{-1} \cdot \bar{G}_{\mu} \cdot \bar{b} + \bar{G}_{\mu}^H \cdot \bar{a}. \quad (14)$$

3.3 调频率滤波器处理结构

从 (14) 式可知，如果动目标引起的线性调频波的斜率已知，则可构造一个矩阵 \bar{G}_{μ} ，在原始回波信号经 FFT 处理后，与矩阵 \bar{G}_{μ} 进行相乘，从而可得到关于动目标的信息。实际情况中， \bar{S}' 中不仅包含动目标信息 \bar{b} ，还包含静止目标信息 \bar{a} ，若 $\bar{a} = \bar{0}$ ，则通过 \bar{S}' 处理后，可以得到动目标成象图。使 \bar{a} 项影响减小的方法很多，如伯格算法，在此不详细讨论。

在第 3.2 节构造 \bar{G}_{μ} 时，是以 μ 已知为前题的，但实际情况不是这样，动目标运动参数未知，即 μ 是不可知的，这样在处理 SAR 动目标问题时，须根据 μ 的运动范围和所需

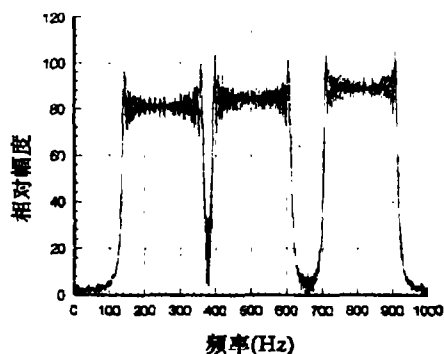


图 2

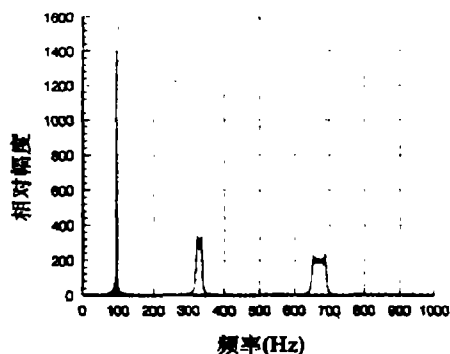


图 3

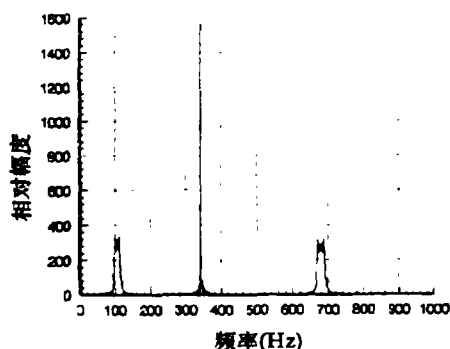


图 4

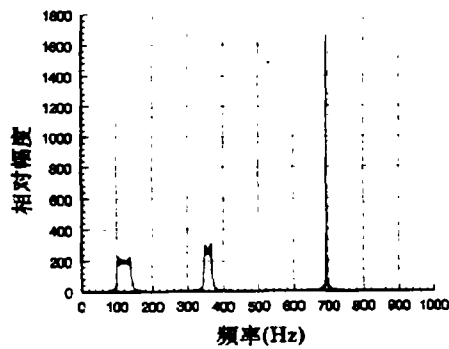


图 5

的调频率分辨率要求, 构造一组 \bar{G}_μ ($\bar{G}_{\mu_1}, \bar{G}_{\mu_2}, \dots, \bar{G}_{\mu_N}$) 矩阵, 与 \bar{S} 相乘, 再根据一定的准则, 提取动目标信息。

事实上, $\bar{G}_{\mu_1}, \bar{G}_{\mu_2}, \dots, \bar{G}_{\mu_N}$ 不必根据定义式去构造, 它可以根据分辨率要求按图 1 结构生成, 这种结构可以预先存贮在处理机中, 极有利于机载实时处理。

4 计算机模拟

根据本文所研究的 SAR 动目标方位聚焦方法, 我们在计算机上进行了模拟实验。系统参数为: 载机高度 9000m, 速度 214.8592m/s (匀速直线飞行), 天线视角 60° , 脉冲重复频率 1000Hz, 波长 0.03m, 波束宽度 2° , 方位分辨率 3m, 方位采样 2048 点。

第一组实验为多个运动目标运动参数不同情况下 (特指方位向速度不同) 的调频率匹配滤波结果, 示于图 2 至图 5。三个运动目标分别处于地面位置 0.0 m, 20.0 m 和 -20.0 m 处, 径向速度分别为 4.33 m/s, 8.66m/s 和 14.0 m/s, 方位向速度分别为 12 m/s, 20 m/s 和 30 m/s, 不考虑地面静止目标的影响。图 2 是此时的回波频谱图, 径向速度的不同

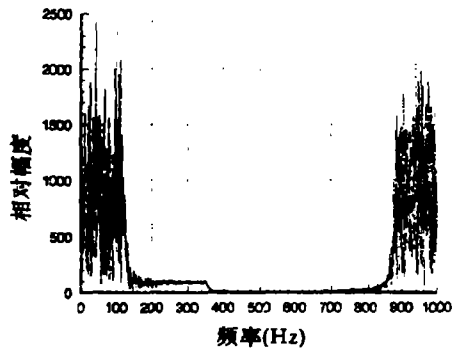


图 6

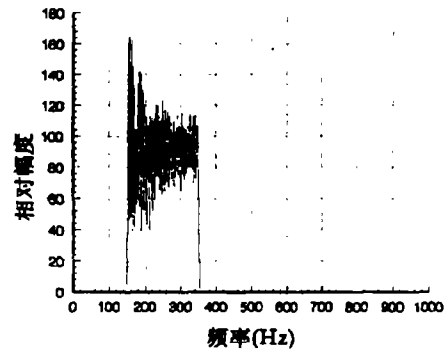


图 7

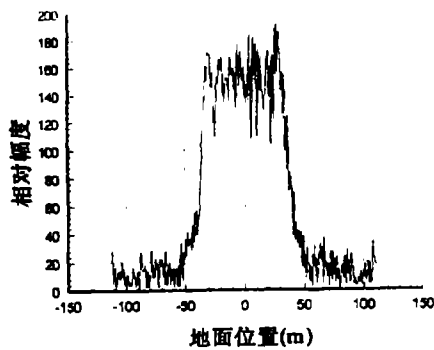


图 8

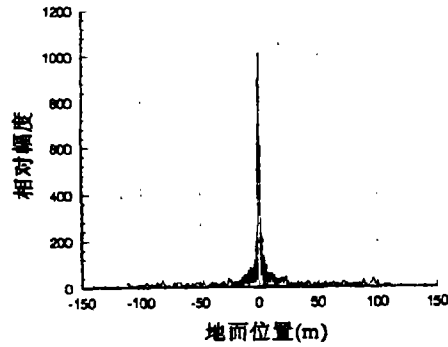


图 9

引起了谱峰中心位置的不同；图 3 至图 5 是分别采用参数 $\gamma = 1.524 \times 10^{-4}$ ， $\gamma = 1.41 \times 10^{-4}$ 和 $\gamma = 1.266 \times 10^{-4}$ 的调频率匹配滤波器处理后的结果，从这三个图可以看到，如果参数匹配得好，信号频谱能够很好地聚焦，幅值相对地大许多，如果匹配不好，虽然也能起到一定的聚焦作用，但幅度值相对地小，根据分辨率要求采用一定的门限就可以提取感兴趣的速度段而“屏蔽”其余的速度区，达到分别精确成像的目的。

第二组实验考虑地面静止目标杂波的影响，实验结果如图 6 至图 9 所示。运动目标位于地面 0.0m，径向速度 V_r 为 4.33m/s，方位向速度 V_c 为 30.0m/s。图 6 是原始接收信号的频谱分布图；图 7 是采用中心频率前置滤波方法，以中心频率在 250Hz、带宽为 250Hz 的带通滤波器进行多普勒中心频率匹配处理后的频谱图；图 8 是不采取聚焦处理而得到的地面成像图，可见图象散焦十分严重，不利于检测和目标提取，对图象的判读产生影响；图 9 是采用参数 $\gamma = 1.266 \times 10^{-4}$ 构造滤波器处理后的结果，运动目标成像在正确的地面位置上，并且聚焦很好，幅度较大，便于判读。

5 结 论

本文根据运动目标回波的特点，引入了多普勒调频率匹配滤波器的概念，并利用这种滤波器来解决由于运动目标方位向速度的存在而引起的成像方位散焦的问题，给出了其

能量会聚作用的理论推导过程和匹配矩阵的一般形式, 提出一种适合快速处理的离线式的匹配矩阵结构。只要运动目标方位向运动参数相同, 通过选择适当的滤波参数和判决门限, 即可得到目标的聚焦图象, 不管是单个目标还是多个目标。由于所述方法是一种参数匹配方法, 缺少自适应性, 因而需要滤波器组进行处理。

参 考 文 献

- [1] Raney R K. IEEE Trans on AES, 1971, AES-7(3): 499-505.
- [2] Freeman A, Currie A. The GEC Journal of Research, 1987, 5(2): 106-115.
- [3] 何峻湘. 动目标合成孔径雷达检测与成像: [硕士论文], 北京航空航天大学, 1994年3月.

A MATCHING FILTER METHOD OF THE QUADRATIC PHASE FOR MOVING TARGETS IMAGING IN SAR

He Junxiang Li Jingwen Zhou Yinqing

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083*)

Abstract Based on the analysis of SAR radar return model, an approach using Doppler-rate matching filter is proposed. It can solve the problem of azimuth defocus because of the quadratic phase mismatch. Then a fast algorithm structure given by matching matrix is presented. The computer simulation results illustrate its availability.

Key words Synthetic aperture radars, Moving targets imaging, Doppler-rate, Matching filter method

何峻湘: 男, 1969年生, 研究生, 雷达、信号与信息处理。

李景文: 男, 1964年生, 副教授, 雷达、信号与信息处理。

周荫清: 男, 1936年生, 教授、博士生导师, 雷达、信号与信息处理。