

SAR 成像中 R-D 方法与信号带宽之间的关系¹

林幼权 倪晋麟 张光义

(南京电子技术研究所 501 分箱 南京 210013)

摘要 该文通过对 R-D 成像方法的分析, 推导了在 R-D 成像方法下雷达工作频率, 信号带宽与成像角之间的关系, 并用计算机仿真进行了验证。

关键词 合成孔径雷达, 距离多普勒成像

中图分类号 TN951

1 前言

自 50 年代出现合成孔径成像 (SAR) 概念以来, 合成孔径成像技术受到了广泛的关注。出现了距离-多普勒 (R-D) 算法^[1], CSA 算法^[2], 非线性 CSA 算法^[3], 以及 ω - k 算法^[4]。这些算法各有特点, 其中 R-D 算法比较简单, 因此到目前为止, 实际使用最多的还是 R-D 算法。但 R-D 算法的性能受到许多因素的限制。

本文首先在理论上分析 R-D 算法成像的过程, 然后探讨这种成像方法与雷达工作频率、信号带宽和成像斜角之间的关系。为在工程中选择合适的雷达工作频率和信号带宽提供理论依据。本文最后给出了仿真结果, 结果证明了本文理论分析的正确性。

2 理论分析

假设雷达发射信号为线性调频信号, 形式为

$$s(\tau) = a_{\tau}(\tau) \exp[j(2\pi f_0\tau - \pi k_r\tau^2)] \quad (1)$$

$a_{\tau}(\tau)$ 为脉冲包络, f_0 为发射信号载频, k_r 为调频斜率。脉冲宽度为 $(-T/2, T/2)$; 回波信号为

$$s_1(t, \tau, r_0) = a_{\tau}[\tau - \frac{2}{c}R(t, r_0)] a_a(t + t_c) \exp[-j\frac{4\pi}{\lambda}R(t, r_0)] \\ \times \left\{ -j\pi k_r \left[\tau - \frac{2}{c}R(t, r_0) \right]^2 \right\} \quad (2)$$

上式为回波信号时间表达式, 其中 a_a 为天线调制包络; t 为雷达处在某一位置的时间标志; τ 为 t 时刻时, 雷达收到信号的时延; R 为雷达和点目标间的斜距; t, τ 表示位置时间参数 (慢速) 和快速时间参数; t_c 表示方位时间偏移, 它对应雷达采样脉冲的中心位置。

如果雷达平台直线飞行, 速度为 v , 点目标到雷达航线的最近距离为 r_0 , 则 R 为

$$R(t, r_0) = (r_0^2 + v^2 t^2)^{1/2}$$

¹ 1999-05-21 收到, 1999-12-10 定稿

将 $s_1(t, \tau, r_0)$ 对 τ , 对 t 进行傅里叶变换成为 $s_2(f_t, f_\tau, r_0)$, 应用相位驻留原理, 并整理得

$$s_2(f_t, f_\tau, r_0) = a_\tau(-f_\tau/k_r)a_a \left(\frac{-f_t r_0 c}{\sqrt{4(f_0 + f_\tau)^2 v^4 - v^2 f_t^2 c^2}} + t_c \right) \exp(j\pi f_\tau^2/k_r) \\ \times \exp \left\{ -j4\pi r_0 \sqrt{\left(\frac{f_0 + f_\tau}{c}\right)^2 - \left(\frac{f_t}{2v}\right)^2} \right\} \quad (3)$$

将 (3) 式的第二相位项按 f_τ 展开, 并取至 f_τ^2 项。

$$\exp \left\{ -j4\pi r_0 \sqrt{\left(\frac{f_0 + f_\tau}{c}\right)^2 - \left(\frac{f_t}{2v}\right)^2} \right\} \\ \approx \exp \left\{ -j4\pi r_0 \left[\frac{\beta(f_t)}{\lambda} + \frac{1}{\lambda f_0 \beta(f_t)} f_\tau + \frac{\beta^2(f_t) - 1}{2\lambda f_0^2 \beta^3(f_t)} f_\tau^2 \right] \right\} \quad (4)$$

这里 $\beta(f_t) = \sqrt{1 - [\lambda f_t/(2v)]^2}$, 则 (3) 式变为

$$s_2(f_t, f_\tau, r_0) = a_\tau(-f_\tau/k_r)a_a \left(\frac{-f_t r_0 c}{\sqrt{4(f_0 + f_\tau)^2 v^4 - v^2 f_t^2 c^2}} + t_c \right) \\ \times \exp \left\{ -j \frac{4\pi r_0 \beta(f_t)}{\lambda} \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi r_0}{\lambda f_0 \beta(f_t)} f_\tau \right\} \\ \times \exp \left\{ j \left[\frac{\pi}{k_r} - \frac{2\pi r_0 (\beta^2(f_t) - 1)}{\lambda f_0^2 \beta^3(f_t)} \right] f_\tau^2 \right\} \quad (5)$$

令 $R(f_t, r_0) = r_0(1 + a(f_t))$, $a(f_t) = 1/\beta(f_t) - 1$, $1/k(f_t, r_0) = 1/k_r + k_{sr}(f_t, r_0)$, $k_{sr}(f_t, r_0) = -2r_0(\beta^2(f_t) - 1)/(\lambda f_0^2 \beta^3(f_t))$. 又: $-f_t r_0 c/\sqrt{4(f_0 + f_\tau)^2 v^4 - v^2 f_t^2 c^2} \approx -\lambda r_0 f_t/(2v^2 \beta(f_t))$, 则

$$s_2(f_t, f_\tau, r_0) = a_\tau(-f_\tau/k_r)a_a \left(\frac{-\lambda r_0 f_t}{2v^2 \beta(f_t)} + t_c \right) \exp\{j\pi f_\tau^2/k(f_t, r_0)\} \\ \times \exp\{-j4\pi f_\tau R(f_t, r_0)/c\} \exp\{-j4\pi r_0 \beta(f_t)/\lambda\} \quad (6)$$

从 (6) 式可以看出, $R(f_t, r_0)$ 为点目标在距离向的走动, $k(f_t, r_0)$ 为 SAR 几何关系引起的对回波信号距离向的修正后的调频斜率。其中 $k_{sr}(f_t, r_0)$ 为所谓的二次距离压缩 (SRC) 的斜率, $R(f_t, r_0)$ 和 $k_{sr}(f_t, r_0)$ 与空间几何关系有关, 而与雷达发射信号无关。在普通 R-D 算法中, 距离走动是通过插值修正的, 并且在距离维压缩时, 不考虑新产生的 $\{-j2\pi r_0(\beta^2(f_t) - 1)/[\lambda f_0^2 \beta^3(f_t)]\} f_\tau^2$ 这一项。这样处理, 在正侧视成像时, 对成像质量影响不大, 因为此时回波信号的多普勒频率在零频附近, 这一项的影响较小, 但当斜侧视成像时, 回波信号的中心多普勒频率不再为零, 这一项的影响将随之增大, 可使图像的距离维分辨率恶化。因此必须进行修正, 有两种改进办法, 改进 I 型和改进 II 型 R-D 算法。

(1) 改进 I 型 R-D 算法

当回波信号的多普勒频率的宽度相对其中心多普勒频率不大时, 采用改进 I 型 R-D 算法, 可以用 $\{-j2\pi r_0(\beta^2(f_{dc}) - 1)/[\lambda f_0^2 \beta^3(f_{dc})]\} f_\tau^2$ (SRC 修正项 I) 进行补偿, 这里 f_{dc} 为回波

信号的多普勒频率的中心值, 如果回波信号的距离维压缩在数字域进行, 那么可以与正常的距离压缩合并进行。

(2) 改进 II 型 R-D 算法

当回波信号的多普勒频率宽度相对中心频率较大时, 应考虑多普勒频率变化的影响, 所以要用改进 II 型 R-D 算法, 按 $\{-j2\pi r_0(\beta^2(f_t) - 1)/[\lambda f_0^2 \beta^3(f_t)]\} f_r^2$ (SRC 修正项 II) 进行补偿, 并且要在频域完成。

两种方法的补偿函数均与参考距离有关, 因此成像幅宽较大时, 成像区域的边缘部分的分辨率变差, 此时应考虑采用其它的成像算法。以两维压缩均在数字域处理为例, 三种 R-D 算法的结构图如图 1 所示。另外 $\{-j2\pi r_0(\beta^2(f_t) - 1)/[\lambda f_0^2 \beta^3(f_t)]\} f_r^2$ 可以简化为 $[j\pi r_0 \lambda f_t^2 / (2v^2 f_0^2)] f_r^2$, 这与文献 [5,6] 中是一致的。

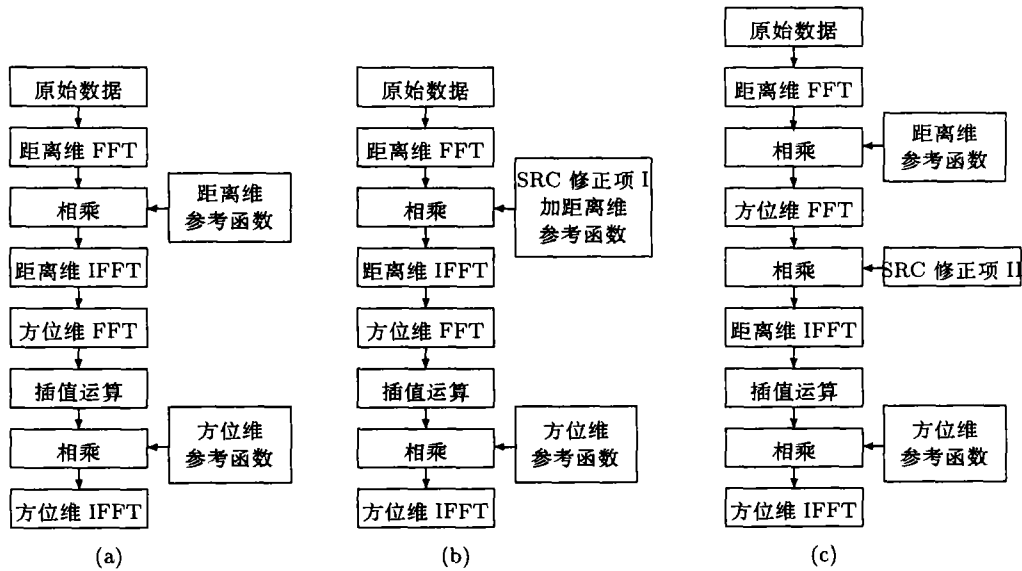


图 1 三种 R-D 算法结构
(a) 普通 R-D 算法处理过程 (b) 改进 I 型 R-D 算法处理过程 (c) 改进 II 型 R-D 算法处理过程

上面算法成立的条件是 $\sqrt{(f_0 + f_r/c)^2 - (f_t/(2v))^2}$ 能够按 f_r 进行级数展开, 其条件为

$$\frac{2}{f_0 [1 - (\lambda f_t / (2v))^2]} f_r + \frac{1}{f_0^2 [1 - (\lambda f_t / (2v))^2]} f_r^2 \ll 1 \quad (7)$$

上式中 f_r 的取值范围为 $-B/2 - B/2$; B 为信号带宽。

令 $x = f_r / f_0$, 上式中“ $\ll 1$ ”改为“ $< A$ ”, $A \ll 1$, 则上式变为 $x^2 + 2x - A\beta^2(f_t) < 0$. 推得

$$x < \sqrt{1 + A\beta^2(f_t)} - 1 \quad \text{或} \quad x < \sqrt{1 + A\beta^2(f_{dc})} - 1 \quad (8)$$

$f_{dc} = (2/\lambda)v \sin \theta_{dc}$, θ_{dc} 为成像斜角。也就是要求

$$(B/f_0) < 2\sqrt{1 + A \cos^2 \theta_{dc}} - 2 \quad (9)$$

此取值与波束指向角有关, 当波束正侧视时 B/f_0 取值最大。而信号带宽 B 取值还与雷达载频有关, 当雷达载频在 VHF(取为 300MHz) 时, B 的取值已不大了。三者之间的具体关系见图 2(A 为 0.2)。

3 仿真

为了验证上节的理论分析结论,按照改进 II 型 R-D 成像算法,分九种情况仿真了对理想点目标的成像。其中图 3—图 5 中,中心载频为 10GHz,信号带宽为 60MHz,成像斜角相应为 0° , 10° , 20° ;图 6—图 8 中心载频为 300MHz,信号带宽为 60MHz,成像斜角相应为 0° , 10° , 20° ;图 9—图 11 中心载频为 300MHz,信号带宽为 30MHz,成像斜角相应为 0° , 10° , 20° 。由于 9 种情况下的载频和成像倾角有差异,因此雷达实际成像时,合成孔径长度有相应变化,且使所有图像在理论上的方位分辨率满足 2.5m 为准。图 3—图 8 的距离分辨率为 2.5m,图 9—图 11 的距离分辨率为 5m。成像时,距离维和方位维均没有加权。图 3—图 11 的横轴表示距离维,纵轴表示方位维。所有图以等高线形式给出,信号幅度的范围为 30dB,也就是中心点为 0dB,第一内圈为 -3dB,最外层为 -30dB。

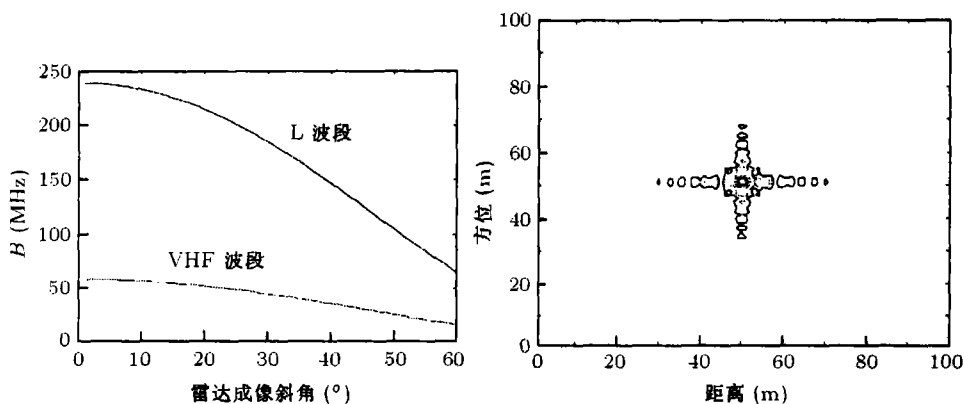


图 2 信号带宽与雷达频率、成像角间的关系

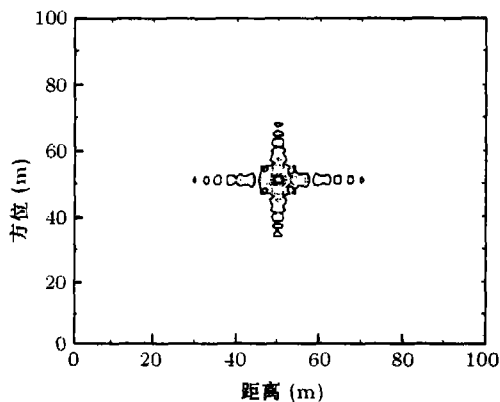


图 3 X 波段,信号带宽为 60MHz,成像斜角为 0° 时的成像结果

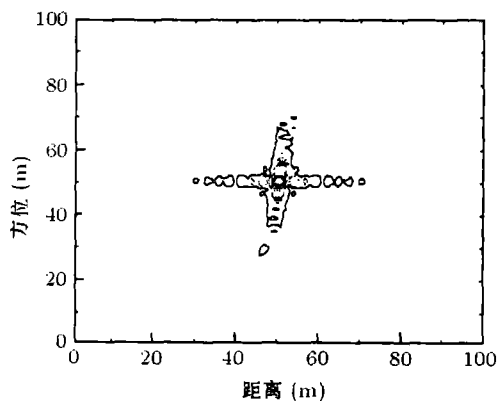


图 4 X 波段,信号带宽为 60MHz,成像斜角为 10° 时的成像结果

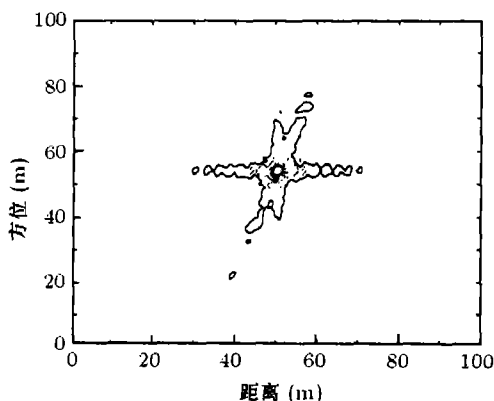


图 5 X 波段,信号带宽为 60MHz,成像斜角为 20° 时的成像结果

从图中可以看出:载频在 10GHz 时,不论成像斜角变化,都能获得较好的成像效果,这是由于信号的载频较高,信号带宽与中心频率之比较小,完全能满足 (9) 式要求;而当载频在 300MHz,信号带宽为 60MHz 时,成像角在 0° , 10° 时成像效果还可以,但在 20° 时,

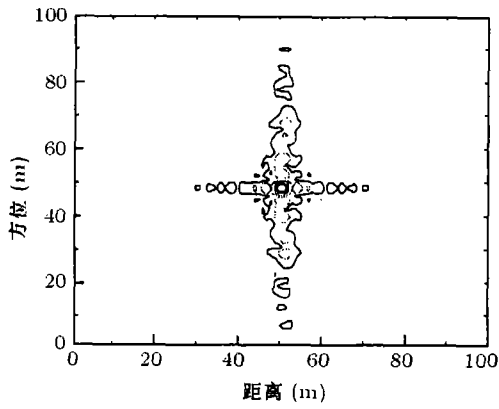


图 6 VHF 波段, 信号带宽为 60MHz, 成像斜角为 0° 时的成像结果

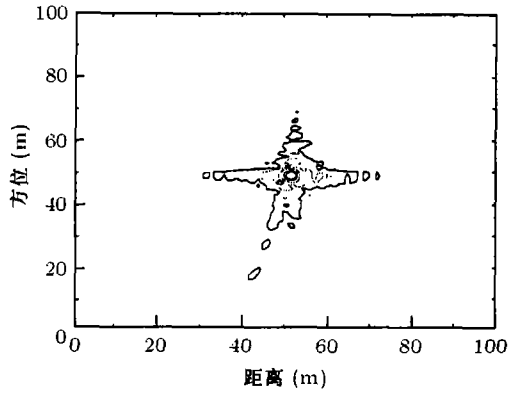


图 7 VHF 波段, 信号带宽为 60MHz, 成像斜角为 10° 时的成像结果

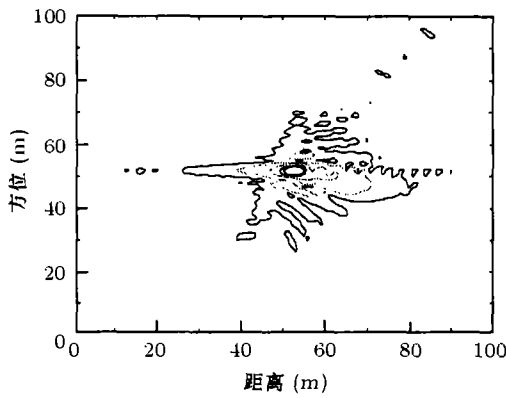


图 8 VHF 波段, 信号带宽为 60MHz, 成像斜角为 20° 时的成像结果

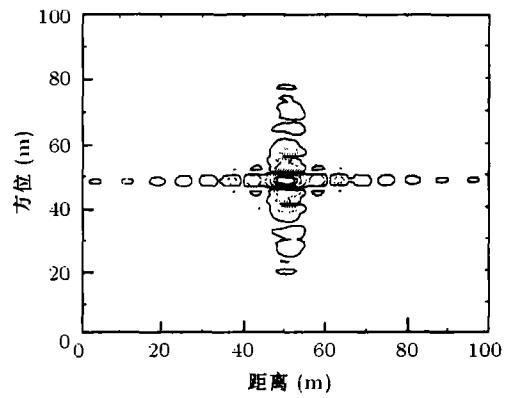


图 9 VHF 波段, 信号带宽为 30MHz, 成像斜角为 0° 时的成像结果

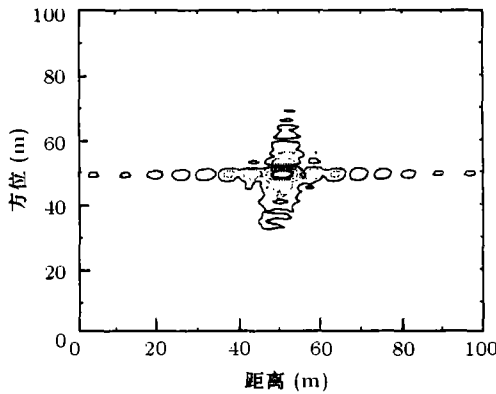


图 10 VHF 波段, 信号带宽为 30MHz, 成像斜角为 10° 时的成像结果

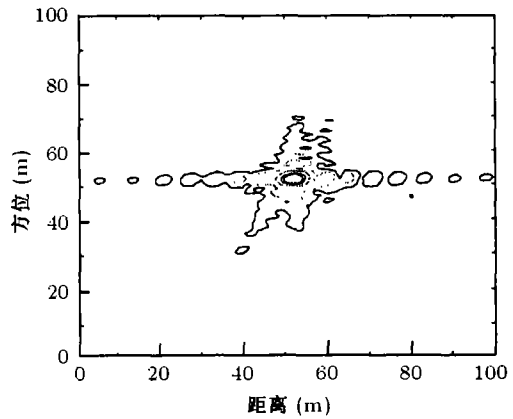


图 11 VHF 波段, 信号带宽为 30MHz, 成像斜角为 20° 时的成像结果

图像明显变差,这是因为最大可用信号带宽随着成像斜角的增大而减小,当成像斜角为 20° 时,已不满足(9)式要求,也就是对(4)式的展开式中被省去的高次项影响增大,当不能对这些高次项进行补偿时,将会使最终成像结果变差;当信号带宽降到 30MHz 时,它们均能满足(9)式,因而三种角度下的图像效果接近。从图 2 中可以看出,在 VHF 波段,当成像斜角在 20° 时,可用的最大信号带宽在 50MHz,因此只要信号带宽小于 50MHz,图像质量不会变坏,仿真结果与图 2 非常符合。

4 结 论

通过对 R-D 成像过程的分析,推导了成像角度、信号带宽和工作频率三者间的关系。仿真结果证明了分析的正确,文中的结果对工程设计中选择成像方法、雷达工作参数具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] C. Wu, B. Barkan, SEASAT synthetic aperture radar data reduction using parallel programmable array processors, IEEE Trans. on GE, 1982, 20(3), 352-358.
- [2] R. K. Raney, H. Runge, R. Bamler, I. G. Cumming, F. H. Wong, Precision SAR processing using chirp scaling, IEEE Trans. on GE, 1994, 32(4), 786-799.
- [3] G. W. Davidson, I. G. Cumming, M. R. Ito, A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data, IEEE Trans. on AES, 1996, 32(1), 121-133.
- [4] C. Cafforio, C. Prati, F. Rocca, SAR data focusing using seismic migration techniques, IEEE Trans. on AES, 1991, 27(2), 199-207.
- [5] M. Jin, C. Wu, A SAR correlation algorithm which accommodates large range migration, IEEE Trans. on GE, 1984, 22(6), 592-597.
- [6] R. Bamler, A comparison of range-Doppler and wave-number domain SAR focusing algorithm, IEEE Trans. on GE, 1992, 30(4), 706-713.

THE RELATIONSHIP BETWEEN R-D ALGORITHM AND SIGNAL FREQUENCY WIDTH IN THE SAR PROCESSING

Lin Youquan Ni Jinlin Zhang Guangyi

(The Nanjing Institute of Electronic Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract With the analysis of R-D algorithm, the relationship between the frequency of radar, the signal frequency width and the squint angle is deduced. The result is identified by computer simulation.

Key words SAR, R-D algorithm

林幼权: 男, 1966 年生, 高级工程师, 长期从事雷达系统设计。

倪晋麟: 男, 1960 年生, 副总工程师, 研究员, 长期从事雷达信号处理研究, 发表数十篇文章。

张光义: 男, 1935 年生, 总工程师, 博士生导师, 中国工程院院士, 长期从事雷达系统设计、相控阵天线设计和信号处理研究。