

SISAR 中运动目标全息信号的表示及仿真研究¹

罗斌凤 张冠杰 张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘要 在运用阴影逆合成孔径雷达 (SISAR) 对运动目标进行成像和识别研究中, 需要得到相关目标的全息信号. 该文在分析目标侧影轮廓与其全息信号关系的基础上, 导出了一种更具普遍意义的全息信号的表达形式, 式中的各组成具有明确的物理含义. 为验证其在实际应用中的有效性, 以外场试验获得两种目标的全息信号为比较对象, 参照外场试验条件进行了仿真. 比较结果说明了该仿真方法实际有效.

关键词 阴影逆合成孔径雷达, 无线电全息信号, 仿真, 前向散射信号

中图分类号 TN951, TN958

1 引言

阴影逆合成孔径雷达 (SISAR) 是双基地雷达中的一种, 通过对接收到的目标穿越雷达基线过程中前向散射波信号的处理可以对低空中、陆地和海面上的低可探测性的目标 (如隐型目标) 进行检测、成像、识别和跟踪^[1-3]. SISAR 中定义的目标无线电全息信号实际是指目标穿越雷达基线及附近的时间段内, 接收点所接收到的关于目标的前向散射波. 因为对该信号的分析处理可以得到目标的侧影像, 该侧影像的幅度表征了目标侧影轮廓的上下边沿高度特征, 相位表征了目标轮廓的中线高度特征, 因此称为全息信号^[3-5]. 上述特性, 使该体制雷达具有对运动目标识别的应用潜力^[3,5]. 要对目标进行识别研究必须获得所需识别目标的无线电全息信号. 对各种目标进行实际的测量很困难. 对于给定的运动目标, 在给定 SISAR 雷达几何配置及目标运动参数前提下, 利用目标的侧影轮廓信息可以仿真出运动目标的全息信号^[4]. 文献 [3, 4] 所阐述的双基地雷达侧影成像原理中所推得的目标的全息信号是通过光学近似法得到的, 并在推导过程中根据 SISAR 的几何配置、目标位置及运动参数做了诸多假设和近似. 本文从文献 [4, 6] 给出的基本公式出发, 通过选择合适的几何坐标简化模型中的参数关系, 得到了一组关于运动目标全息信号的数学表达式. 和文献 [3, 5] 给出的表达式相比, 新的表达式具有普遍性, 其物理含义明确简洁, 便于对 SISAR 的理解. 本文对两者的等价性作了简要说明; 利用这些公式给出了具体的仿真方法. 作为有效性验证, 利用已有的外场试验获得的两种运动目标的实测全息信号数据作为比较对象, 按照外场的试验条件对上述两目标进行了仿真, 并把仿真的结果和实验测量获得的数据进行了比较. 比较结果说明了所提出的运动目标的全息信号仿真方法有效, 对发现的一些差异作了解释和说明.

2 全息信号表示

SISAR 几何配置如图 1 所示. 辐射源置于坐标系 (x, y, z) 的原点 o , 接收点在坐标系横轴 $B(b, 0, 0)$ 处. η, ζ 是直角坐标系 (ξ, η, ζ) 中 (η, ζ) 平面的坐标, 其原点为目标的目标中心点 p . 两坐标系对应轴相互平行. 目标以速度 V 与 x 轴成角度 ψ 运动. 目标中心点在 (x, y) 平面的坐标分别为 x_p 、 y_p . 它与基线的交点到原点 o 的距离为 x_0 .

¹ 2002-05-27 收到, 2002-12-30 改回
国家部委科技预研资助项目 (No 57.7.2.10)

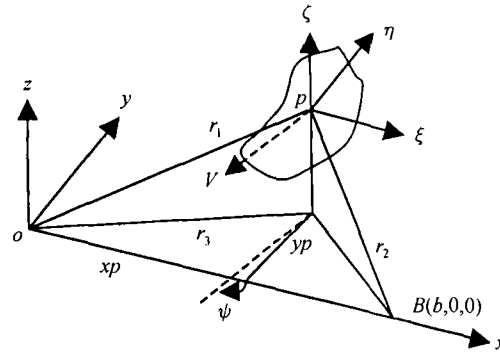


图 1 SISAR 雷达及目标的几何关系示意图

运动目标的全息信号对应于目标散射的非涅耳区近似值^[4,6], 在图 1 坐标系中可表示为

$$\dot{E}_T \cong \frac{ke^{jkb}}{2\pi r_1 r_2} \iint \varepsilon_s(\eta, \zeta) \exp\{j\Omega^2[(\eta - \eta_N)^2 + (\zeta - \zeta_N)^2]\} d\zeta d\eta, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1)$$

式中 $r_1 = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$, $r_2 = ((b-x)^2 + z^2 + y^2)^{1/2}$, b 为基线长度, (x, y, z) 为所设定的目标中心点 p 的坐标. η_N, ζ_N 是接收点 B 在平面 (η, ζ) 中的坐标. Ω 反比于非涅耳区的半径 r_F , 当 $b > xp > 0$ 时其关系如下:

$$\Omega = \sqrt{\frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{xp} + \frac{1}{b-xp} \right)} = \frac{\sqrt{\pi}}{r_F} \quad (2)$$

$\varepsilon_s(\eta, \zeta)$ 为侧影孔径 S 的场分布, 其分布在侧影轮廓内取值, 在侧影轮廓外为零,

$$\varepsilon_s(\eta, \zeta) = \begin{cases} 1, & (\eta, \zeta) \in S_s \\ 0, & (\eta, \zeta) \notin S_s \end{cases} \quad (3)$$

当目标以速度 V 平行 (x, y) 平面直线运动, 且与基线夹角为 ψ 时, 其运动方程为

$$xp = x_0 + Vt \cos \psi, \quad yp = Vt \sin \psi, \quad z = z_0 \quad (4)$$

下标 0 表示目标穿越基线时刻. 目标在按 (4) 式运动的过程中, 沿着坐标 η 的目标侧影的尺寸发生了某些改变, 其变化与 $\theta \approx \psi - \beta_1$ 有关, 其中 $\beta_1 = \arctg(y/x)$ 为目标相对于辐射点的方位角. 但目标在基线附近运动时, 可近似认为 $\theta = \psi$. 在上述情况下, 考虑目标侧影的可变因子 θ 并忽略沿坐标 ζ 的侧影轮廓的改变, 引入在 $\theta = \pi/2$, $yp = 0$ 时达到的最大侧影孔径 $\varepsilon_T(\zeta, \eta)$ ($\varepsilon_T(\zeta, \eta)$ 不随时间变化):

$$\varepsilon_s(\eta, \zeta) \approx \varepsilon_T(\eta/|\sin \theta|, \zeta) \quad (5)$$

设 Ω 在观测时间内为常数, $xp \approx x_0$, 把 (4) 式和 (5) 式代入 (1) 式, 并考虑 $\eta_N = -yp$, $\zeta_N = -z_0$, 变量替换后, 得到

$$\dot{E}(t) = \dot{Q} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{H}(\eta) \exp \left[j \frac{\gamma}{2} \left(\frac{\eta}{v} + t \right)^2 \right] d\eta \quad (6)$$

$$\dot{Q} = \frac{k \sin \psi}{2\pi j r_1 r_2} \exp(jkb + j\Omega^2 z_0^2) \quad (7)$$

$$\gamma = 2\Omega^2 V^2 \sin^2 \psi \quad (8)$$

$$\dot{H}(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_T(\zeta, \eta) \exp(j\Omega^2\zeta^2 + j2\Omega^2z_0\zeta) d\zeta = \int_{c(\eta)-h(\eta)/2}^{c(\eta)+h(\eta)/2} \exp(j\Omega^2\zeta^2) \exp(jk\alpha_1\zeta) d\zeta \quad (9)$$

$h(\eta)$, $c(\eta)$ 分别为 η 对应的侧影轮廓上下边沿的高度差及其中线高度, 其中 $\alpha_1 = z_0b/[(b-x_0)x_0]$. (6) 式就是接收点获得的关于运动目标的全息信号.

分析各关系式的内涵, (7) 式表示的是目标与雷达相对几何关系对全息信号的影响, 其幅度与目标到发射点或接收点的距离均成反比, 与目标运动方向和基线的夹角的正弦成正比, 与信号波长成反比例, 这些均是双基雷达的基本特性^[1]. 其相位由两部分组成, 一部分是由雷达基线距离 b 确定的相位, 一部分是给定菲涅耳区半径 r_F , 由高度 z_0 确定的相位, 它们的相位和等同于信号由发射点到达目标中心, 再经由目标中心散射到达接收点延迟之和引起的相位, 但前者的空间几何概念明确. (9) 式可分为两个部分, 说明的是如下的概念: 一部分是在以目标中心点为原点的直角坐标系 (ξ, η, ζ) 中考虑当给定 r_F 与 η 时高度 ζ 带来的相位影响; 另一部分是两坐标系在高度方向上的相互影响产生的相位. (8) 式 γ 的物理含义是目标中心点在 t 时刻多普勒频率的变化率, 与之相关联的是 (6) 式中 $\exp[j(\gamma/2)[(\eta/v) + t]^2]$ 的相位, 它表明的是给定时刻 t , 在 η 点由于目标运动带来的多普勒频率的变化率引起的相位. 可见, (6)、(7)、(8) 和 (9) 式给出了明确的物理内涵, 这就便于分析目标自身特性、目标运动参数、目标与雷达的几何配置关系对全息信号的影响.

为说明与文献 [3] 中全息信号的等效性, 在图 1 坐标几何结构下经变量替换, 其主要公式为

$$\dot{H}'(\eta) = \int_{c(\eta)-h(\eta)/2}^{c(\eta)+h(\eta)/2} \exp(ik\zeta n_1(t)) d\zeta \quad (10)$$

$$\dot{E}'_T(t) = \sin \psi \int \dot{H}'(\eta) \exp[ik\eta n_2(t) \sin \psi] d\eta \quad (11)$$

$$n_1(t) = \sin \alpha_1(t) \cong (z_0 + \zeta)b/[(x_0^2 + (z_0 + \zeta)^2)((b-x_0)^2 + (z_0 + \zeta)^2)]^{1/2} \quad (12)$$

$$n_2(t) \sin \theta \cong -bVt \sin^2 \psi / [(b-x_0)^2 + z_0^2]^{1/2} \quad (13)$$

(12) 式在 z_0 处级数展开, 取常数项和一次项, 并假设 $(z_0 + \zeta)$ 远小于 x_0 和 $(b-x_0)$, 代入 (10) 式, 可以证明 (9) 和 (10) 等效. (11) 式与 (6) 式相比差一个常数因子 (文献 [3] 给出说明); (11) 式积分号内的相位只取了时间的线性项, 忽略了一个与 η 有关的常数项以及时间的平方项 (高阶项). 与 η 有关的常数项可以忽略, 事实上当信号的积累时间较长, 该时间的平方项不能够忽略. 除此之外, 它们是等价的.

3 运动目标全息信号仿真

依据上面的分析, 由运动目标模型和运动参数产生运动目标全息信号步骤为:

- (1) 根据目标几何结构产生目标的侧影轮廓离散边界分布点的坐标即建立目标在坐标系 (ξ, η, ζ) 中的位置;
- (2) 设定 λ , V , $p(x_0, y_0, z_0)$, t_0 时间步长 Δt , 观测总时间等参数;
- (3) 计算目标中心轨迹 $p(x_i, y_i, z_i)$, 由中心轨迹计算对应的 r_1, r_2 ;
- (4) 计算 Ω 、 a_1 , 按 (9) 式计算 $\dot{H}(\eta)$, 按 (7)、(8) 式计算 \dot{Q}, γ ;
- (5) 按 (6) 式计算出 $\dot{E}_T(t)$.

图 2(a) 与图 2(b) 分别是目标 1 (实际长度 13.46m) 和目标 2 (实际长度 21.5m) 的侧影轮廓图, 仿真条件为 $b = 38.5\text{km}$, $z_0 = 100\text{m}$, $\lambda = 0.34\text{m}$, $V = 200\text{m/s}$, $\psi = 90^\circ$, 目标 1 的

$x_0 = 20\text{km}$, 目标 2 的 $x_0 = 30\text{km}$ 。图 3(a), 3(b), 3(c) 分别为仿真得到的目标 1 的全息信号实部、虚部及合成时域波形 (时间长度为 8s , 滤除了高频分量和直流分量) ; 图 4(a), 4(b), 4(c) 分别为仿真得到的目标 2 全息信号实部、虚部及合成时域波形。

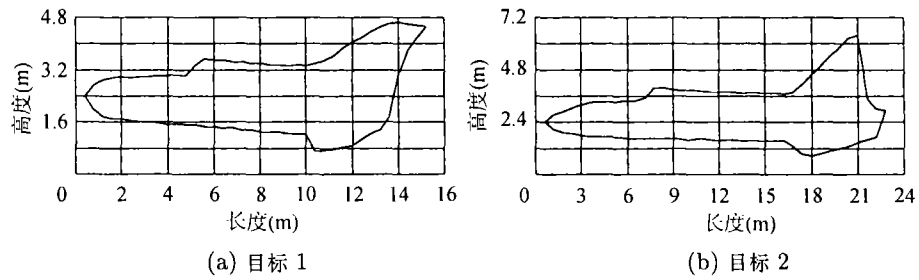


图 2 目标侧影轮廓图

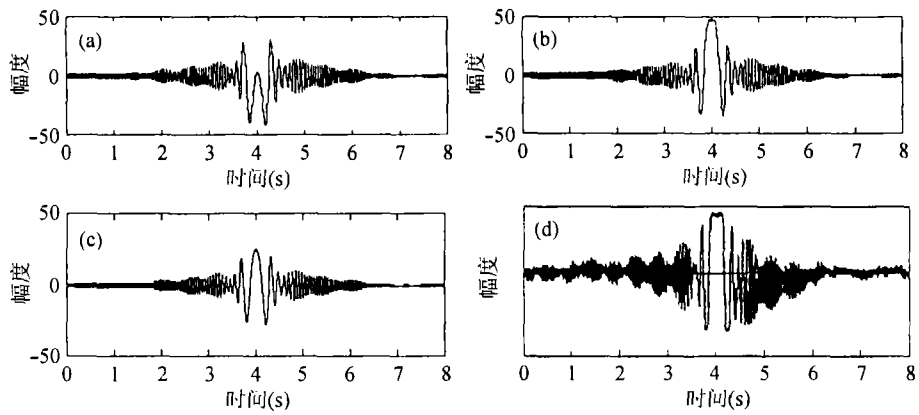


图 3 目标 1 仿真波形与实测数据的比较

(a) 仿真的全息信号实部 (b) 仿真的全息信号虚部 (c) 合成的全息信号 (d) 实测的目标 1 全息信号

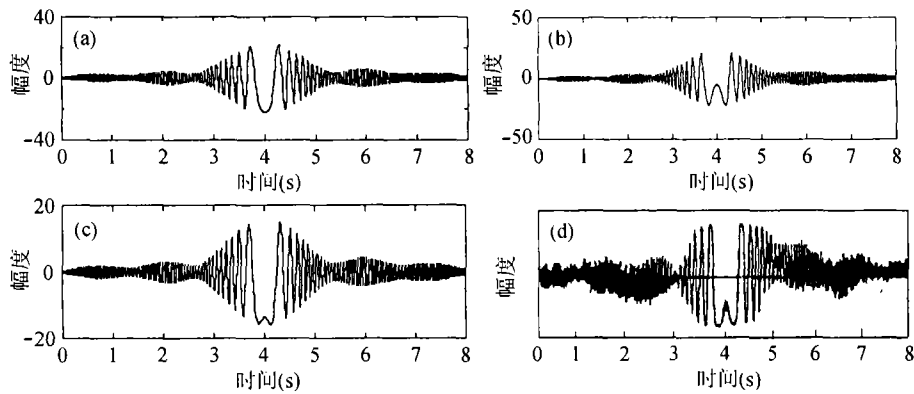


图 4 目标 2 仿真波形与实测数据的比较

(a) 仿真的全息信号实部 (b) 仿真的全息信号虚部 (c) 合成的全息信号 (d) 实测的目标 2 全息信号

4 结 论

作为比较,图 3(d)和 4(d)是实际目标 1 和 2 在相同仿真条件下外场实验得到的全息信号(合成振幅波形图),记录时间为 8s。实验过程中发射信号为 0.5W 的正弦波信号,收、发天线均为架高 30m 的喇叭天线。

通过仿真及与实测全息信号数据的比较,可见仿真与实际结果很吻合。仔细观察它们的区别,试验得到的全息信号包含有噪声和干扰,但其旁瓣比仿真的要好。这主要是由发射天线和接收天线波束方向造成的,即在基线附近(对应时间轴中心附近)接收增益大,远离基线信号接收增益小。可以得到如下结论:该文所给的仿真方法基本能够反映实际情况;对于不同的目标,其全息信号波形有明显的区别,并且具有不同的旁瓣电平,这也从信号时域角度说明了全息信号具有区分目标的特性。

受能够获得实测数据的制约,对具有其它侧影轮廓的运动目标不能够做进一步的比较,另外,对目标飞行方位的变化及目标相对基线交点在不同位置对全息信号仿真的影响值得进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 杨振起,张永顺,等,双(多)基地雷达系统,北京,国防工业出版社,1998,200-205.
- [2] Nichola J. whills,著,张祖稷,吴曼青,等,译,双基地雷达,合肥,机电部 38 所,1992,107-110.
- [3] 张涛,张群,等,基于时频分析的双基地前向散射雷达侧影成像,电子学报,2001,29(6),726-729.
- [4] B. S. Surikov, E. A. Khasina, V. V. Chapursky, Correlation and spectral functions of one-dimensional radio holograms synthesized at small diffraction angles, Radiotekhnika I Elektronika, 1989 xxxii(2), 409-419.
- [5] 张涛,基于双基地前向散射栅栏雷达的侧影成像及识别研究, [博士论文],西安,西安电子科技大学,2001. 10.
- [6] A. Papoulis, Systems and Transforms with Applications in Optics, N. Y., McGraw Hill Book Company, 1980, 203-224.

THE EXPRESSION AND SIMULATION OF RADIO HOLOGRAPHIC SIGNAL FOR THE MOVING OBJECT IN SISAR

Luo Binfeng Zhang Guanjie Zhang Shouhong

(Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract The simulation of radio holographic signal for moving objects acts an important role in the study of the target imaging and recognition in the research of the SISAR. A generalized expression is induced on the basis of analyzing the relation between the shadow of the moving target and its radio holographic signal. Further, each component in the expression has explicit physical signification. The validity of the method is shown by the comparison of the simulation results with the experimental results of two air moving targets in the same condition.

Key words Shadow inverse synthetic aperture radar, Radio holographic signal, Simulation, Forward scattering signal

罗斌凤: 男, 1966 年生, 博士生, 副教授, 现从事信号处理、雷达成像等方面的研究工作。

张冠杰: 男, 1960 年生, 博士生, 研究员, 西安电子工程研究所所长, 现从事阵列信号处理、雷达成像等方面的研究工作。

张守宏: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事时频分布、雷达成像、阵列信号处理、高分辨信号处理等方面的研究工作。