

天线尺寸对冲激信号 SAR 方位向积累的影响¹

粟 毅 匡纲要 陆仲良

(国防科技大学电子工程学院 长沙 410073)

摘 要 该文分析了冲激信号 / 极窄脉冲 SAR 成像系统的天线在辐射与接收时存在的时-空耦合问题。结合冲激信号 SAR 成像方法反向投影法 (BP), 本文在时域上分析了天线尺寸对 SAR 方位向积累的影响, 给出了方位向积累与天线尺寸的定量关系, 最后给出了关于超宽带 SAR 天线设计及发射信号参数选择的有用的结论。

关键词 超宽带雷达, 合成孔径雷达, 方位向积累, 雷达天线

中图分类号 TN958, TN957.2

1 引 言

冲激信号 SAR 方位向处理所采用的相参积累是基于接收信号波形的, 所以积累过程中接收波形变化是一个必须考虑的问题。因为 SAR 波形变化发生在从辐射、目标散射到接收的每一个环节, 这是与稳态, 尤其是与窄带系统有很大区别的。波形变化可分为: (1) 随机变化。目标散射的信号波形是随机的, 这是因为对于超宽带信号, 目标的强反射点是可观测的, 而强反射点个数及雷达与目标的相对视角是难以预知的。(2) 非随机变化。主要是冲激信号的时-空相关, 它包含有二重意义: (a) 辐射、接收信号波形与方向有关, 即波形随方向变化将影响 SAR 方位向积累的效率, 尤其对于物理上可实现的双极辐射信号; (b) 天线的方向特性依赖于信号波形, 这意味着天线增益、波束宽度的定义完全不同于常规的窄带天线理论。Harmuth^[1] 给出了时-空相关的简单示意图, 见图 1。可以看出, N 元等幅天线阵在其最大辐射方向 ($\theta = 0$), 场强增大 N 倍, 同时波形不变, 但在其他方向, 由于路径差引起时延, 使得合成辐射场的波形延长, 形状畸变, 其极限情况, 辐射场强仅维持单个阵元的值, 但波形持续时间增加了 N 倍。

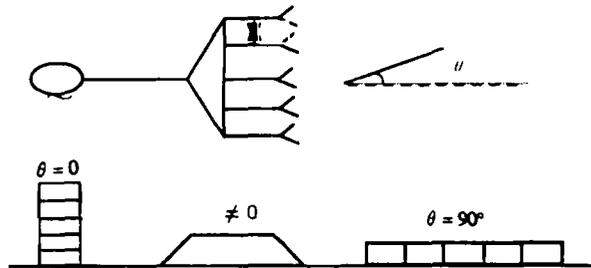


图 1 时-空相关现象

如果下式满足, 可以不考虑时-空相关的影响,

$$T_A \equiv (L/c) \sin \theta \ll T, \quad (1)$$

式中 L 为天线长度, c 为光速, T 为信号持续时间。对于超宽带系统, (1) 式并非总是可以满足的^[2]。关于波形变化的随机性部分对 SAR 方位向积累的影响, 本文不作具体研究,

¹ 1998-12-31 收到, 1999-07-08 定稿

国家自然科学基金资助项目 (批号: 6968201)

因为这一问题具有不可预测性。另外目标后向散射的方向性有可能被利用以增强 SAR 系统的目标检测能力^[3]。

在以下内容中将具体研究时-空相关对 SAR 系统的影响。一方面,为满足(1)式,我们希望 L 越小越好。另一方面,我们希望增加 L 以提高天线增益。所以这两个问题是不可分离的,须在一起加以研究。在后续内容中, SAR 方位向处理采用反向投影法(BP)^[4],研究 SAR(冲激)系统的天线尺寸对方位向积累的影响,最终从系统的角度对天线设计提出要求。

2 天线时-空相关

设天线在方位向的尺寸为 L_e ,天线的口孔是矩形或长方形的,口径场幅度分布按一般最大增益设计^[5],可假设为

$$E(x/L_e) = 0.7[1 - (2x/L_e)^2] + 0.3, \quad -L_e/2 \leq x \leq L_e/2. \quad (2)$$

如天线中心为参考点,去除天线辐射场中的距离衰减因子(BP法可以事后补偿),考虑到天线尺寸 L_e 较 SAR 工作距离可以忽略不计,假设天线口面瞬态场波形为 $s(t)$,由辐射场叠加原理,天线辐射的远场信号波形为

$$e(t) = \int_{-L_e/2}^{L_e/2} E\left(\frac{x}{L_e}\right) s\left(t - \frac{x}{c} \sin \theta - \frac{R}{c}\right) dx, \quad (3)$$

式中 R 为口径到目标的距离。理论上,口径场的信号与系统的发射信号是不相同的,但对于本文讨论的两种波形,在天线频带设计正确条件下,后者作为前者的近似具有足够的精度。

在 SAR BP 处理中,(3)式中 R/c 时延可以补偿掉,因此我们可以将(3)式写成

$$e(t) = \int_{-L_e/2}^{L_e/2} E\left(\frac{x}{L_e}\right) s\left(t - \frac{x}{c} \sin \theta\right) dx. \quad (4)$$

(4)式即为辐射波形与辐射方向、场分布及发射波形的关系,它具有方向图的意义,因此我们定义(4)式为冲激 SAR 天线方位向方向图,不过在此,我们不是用功率或能量的概念,而是用瞬时场强。(4)式很适于研究冲激信号 SAR 系统的工作情况,因为 SAR 方位向处理是波形相参相加,而常规的功率和能量没有相位或时延信息,无法反映 SAR 系统实际工作情况。(4)式为口径分布与信号波形的卷积关系。从时-空相关的另一个角度考虑,由于信号波形随方位角变化而变化,见图 2,在 SAR 方位向积累过程中,接收波形的变化势必影响积累效率。以下定量分析这一影响的大小。

3 时-空相关对 SAR 方位向积累的影响

如以线阵模型表征正侧视 SAR 的成像过程图 3,若设 $r_j(t)$ 为第 j 个阵元接收到的回波信号, $T_{i,j,k}$ 为第 j 个阵元与成像区中第 (i,k) 个象点的时延,应用 BP 法得第 (i,k) 点的像(散射强度)为

$$x_{i,k}(t) = \sum_{j=-k}^k r_j(t + T_{i,k,j}). \quad (5)$$

$2k$ 为脉冲积累的个数。假设 SAR 回波是目标的镜象反射信号,目标入射波与后向散射波形相同。由于经 BP 处理后,(5)式中的时延 $T_{i,k,j}$ 得到严格补偿,因此

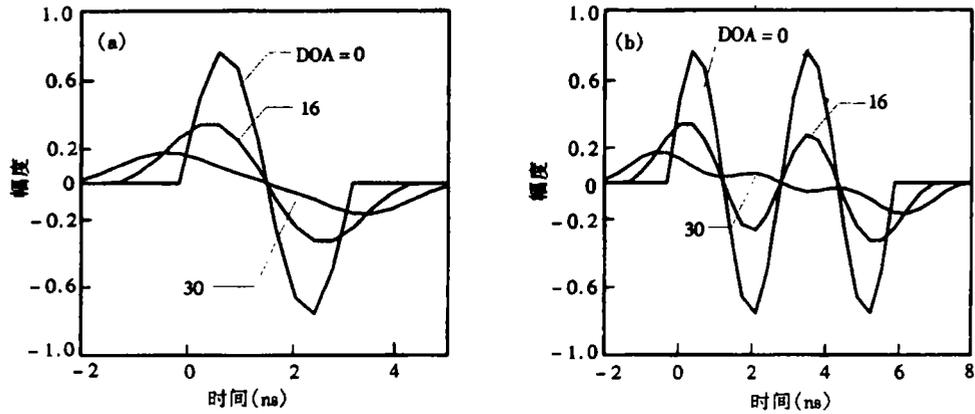


图 2 天线辐射波形 ($T=3ns$, $L_e=1$)
(a) 单周波 (b) 双周波

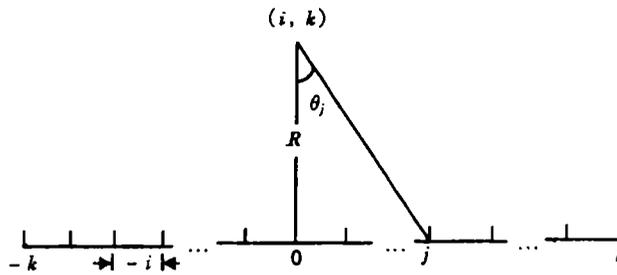


图 3 SAR 线阵描述

$$r_j(t) = e_j(t - (x/c) \sin \theta_j), \tag{6}$$

式中 $\theta_j = \arg \operatorname{tg}(jl/R)$, l 为载机的步进距离.

这时

$$x_{i,k}(t) = \sum_{j=-k}^k r_j(t) = \sum_{j=-k}^k \int_{-\frac{L_e}{2}}^{\frac{L_e}{2}} E\left(\frac{x}{L_e}\right) s\left(t - \frac{2x}{c} \sin \theta_j\right) dx. \tag{8}$$

对于单周波、多周波及给定口径场分布,

$$x_{i,k}(t) = \sum_{j=-k}^k \int_{-\frac{L_e}{2}}^{\frac{L_e}{2}} \left[1 - 0.7\left(\frac{2x}{L_e}\right)^2\right] \sin \omega_0(t - c_j x) [u(t - c_j x) - u(t - c_j x - T_1)] dx, \tag{9}$$

式中 $c_j = (2 \sin \theta_j)/c$,

$$x_{i,k}(t) = \sum_{j=-k}^k \left\{ \frac{1}{\omega_0 c_j} \cos \omega_0(t - c_j x) - 0.7 \left(\frac{2}{L_e} \right)^2 \frac{1}{\omega_0 c_j} [x^2 \cos \omega_0(t - c_j x) + \frac{2}{\omega_0 c_j} x \sin \omega_0(t - c_j x) - \frac{2}{\omega_0^2 c_j^2} \cos \omega_0(t - c_j x)] \right\} x_b^a \quad (10)$$

(10) 式中, 当 $\theta_j > 0$ 或 $j > 0$, $x_a = \min\{1/c_j, L_e/2\}$, $x_b = \max\{(t - T)/c_j, -L_e/2\}$;
 当 $\theta_j < 0$ 或 $j < 0$, $x_a = \min\{(t - T)/c_j, L_e/2\}$, $x_b = \max\{t/c_j, -L_e/2\}$;
 当 $\theta_j = 0$ 或 $j = 0$, $x_1 = L_e/2$, $x_b = -L_e/2$;
 $t \in [0, T]$.

(10) 式是在给定口径场分布及发射信号波形时, BP 成像结果与天线口径尺寸 L_e 、信号脉宽 T 的显式关系, 我们根据实际情况做计算如下: 设 $R=5\text{km}$, $l=1\text{m}$, 计算 θ 最大为 30° , $k=2900$. 图 4 给出了这一条件下的计算结果. 图中曲线以脉冲宽度为参量. 三条曲线具有相同的变化规律. 在 L_e 较小时, 呈单调上升趋势, 说明此时, 天线的增益因 L_e 增加而增加, 并起决定作用. 但当 L_e 增加到一定长度时, SAR 积累强度开始下降. 说明此时时-空相关开始起决定作用. 这就产生了一个最佳口径尺寸 L'_e . 当天线设计为 L'_e , SAR 系统具有最为有效的方位向积累, 因而有最大的作用距离. 当脉冲宽度 T 减小时, L'_e 也随之减小, 如图 4(a) 所示单周波, 当 $T=3\text{ns}$ 、 $L'_e=1.2$ 米, $T=2.5\text{ns}$ 、 $L'_e=0.7$ 米, $T=2\text{ns}$ 、 $L'_e=0.4$ 米. 这一规律符合时-空相关的物理意义. 因为对于同样的时间差, 脉冲宽度越小, 产生的相位差越大. 这一结果提示我们, 在发射波形的频谱满足系统带宽要求条件下, 周期应尽可能大, 以提高系统积累强度. 从图 4(a) 还可以看出, 当 $L_e > L'_e$, SAR 积累强度下降的速度是缓慢的, 因此, 如发射波形为单周波, 在天线口径场分布难以准确确定时, 口径尺寸可以选择大一些. 对双周波, 情况有所不同, 因图 4(b) 曲线变化较快, 天线口径场尺寸选择自由度不大. 在相同周期条件下, 发射单周波的天线尺寸较之发射单周波的天线尺寸要小. 从时-空相关的角度, 发射波形应选择单周波, 另外单周波的相对带宽也比双周波宽, 这对提高距离向分辨率有利.

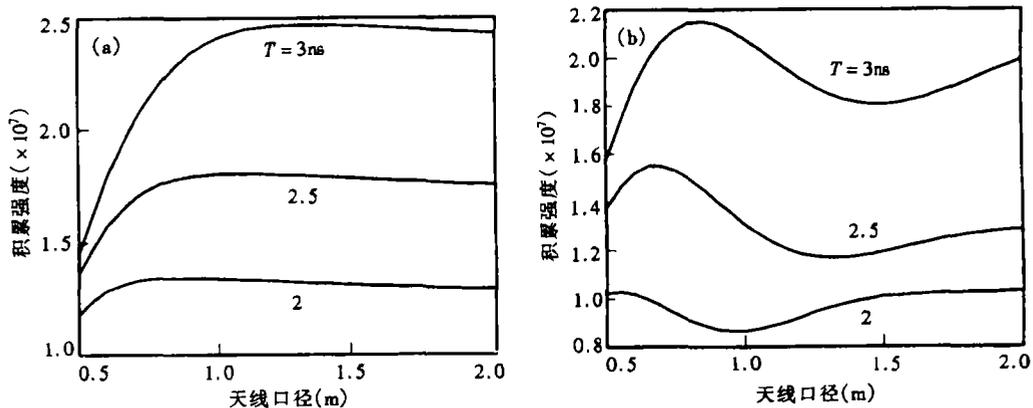


图 4 时-空相关对 SAR 积累影响
 (a) 单周波 (b) 双周波

这里我们给出了口径尺寸对 SAR 积累强度的影响, 如果给定口径尺寸, 也可以计算口径场分布对积累强度的影响, 从而在设计天线时, 选择合适的口径场分布。

4 结 论

我们从冲激信号辐射时-空相关的概念出发, 导出了辐射远场与场分布及发射波形的关系, 并定义它为冲激信号 SAR 系统天线的方向图, 结合 SAR 的方位向 BP 处理, 我们给出了严格的方位向积累效率与天线口径尺寸的关系, 这一关系对于冲激信号 SAR 的天线尺寸设计具有指导意义。另外在给定天线尺寸时, 我们也可利用本文的结果计算方位向积累与发射信号脉冲宽度, 天线口径尺寸的关系, 从而指导设计发射机及天线口径场分布。

参 考 文 献

- [1] Harmuth H F. Nonsinusoidal waves for radar and radio communications, New York: Academic, 1981, chapter 3.
- [2] 梁甸农等. 穿透叶簇超宽带 SAR 体制及关键技术项目论证报告. 长沙: 国防科技大学电子技术系, 1996. 6.
- [3] Chaney D, Willisky A S, Novak L M. Coherent aspect-dependent SAR image formation, SPIE 2230, 1994, 256-265.
- [4] McCorkle J W. Focusing of synthetic aperture ultra-wideband data, Proc. IGARSS'89, Vancouver: 1989, 1-5.
- [5] 陆仲良等. 冲激雷达反隐身机理及关键技术研究. 长沙: 国防科技大学研究报告, 1995 年.

EFFECT OF ANTENNA SIZE ON IMPULSE SIGNAL SAR AZIMUTH ACCUMULATION

Su Yi Kuang Gangyao Liu Zhongliang

(The Institute of Electronic Engineering, NUDT, Changsha 410073)

Abstract In this paper, the temporal-spatial coupling problem about antenna radiating and receiving of impulse signal SAR is analysed. Using back projection method, an impulse signal SAR imaging algorithm, antenna size how affects the impulse signal SAR azimuth accumulation is analysed in time-domain, the quantificational relation between azimuth accumulation and antenna size is presented. Finally, some usable conclusions about designing ultrawide band SAR antenna and selecting the parameter of transmitting are given.

Key words Ultrawide band radar, Synthetic aperture radar, Azimuth accumulation, Radar antenna

粟 毅: 男, 1961 年生, 副教授, 现主要从事超宽带雷达系统、SAR 成像技术等方面的研究。

匡纲要: 男, 1966 年生, 博士, 副教授, 现主要从事超宽带雷达信号处理方面的研究。

陆仲良: 男, 1931 年生, 教授, 现主要从事超宽带雷达系统、信号处理方面的研究。