

基于多电视台子孔径综合的无源雷达成像算法

张馨文 王 俊

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文提出一种基于多电视台子孔径综合的无源雷达成像算法。该算法通过单个接收机接收来自位于不同视线角的多个电视台的反射信号,将目标小角度转动时得到的各电视台回波形成的所有子孔径综合为等效大孔径的方法来对运动目标进行成像。该算法利用电视台的载频信号,相关计算简单,在电视台分布密集的区域,目标小角度转动即可成像。仿真结果证实了该算法的有效性。

关键词: 无源雷达成像; 电视台; 子孔径综合; 相关

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)03-0528-04

Passive Radar Imaging Algorithm Based on Sub-apertures Synthesis of Multiple Television Stations

Zhang Xin-wen Wang Jun

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

Abstract: A passive radar imaging algorithm is presented in the paper. Receiving the reflected signals from multiple television stations located at various aspect angles, the algorithm can image moving object by synthesizing multiple sub-apertures of the television stations which are induced by the small angular rotations of the object into a wide-angle equivalent aperture. In addition to the low complexity in computation, the algorithm only uses the carrier waves of television stations while requires a small rotation angle of object in the area where dense television stations are available. Finally, the theoretical validity is illustrated by simulation results.

Key words: Passive radar imaging; Multiple television stations; Sub-aperture synthesis; Coherent

1 引言

采用电视、广播等民用机会照射源作为辐射源的双/多基地雷达,充分发挥了常规雷达的优点,又具有较强的生存能力^[1]。利用该体制雷达对运动目标进行成像,可用于目标分类、识别等^[2],具有广泛的应用前景。

然而,非合作的机会照射源的辐射信号并非像常规雷达那样可调制成大时宽带积信号,其带宽窄,且能量主要集中在信号载波附近,在这种条件下,一些雷达成像中的经典算法并不适用^[3]。

在 ISAR 中,获得高分辨率需要大的目标累积转角,然而在实际系统中,一方面大转角需要时间长,难以满足实时要求;另一方面,目标散射函数在不同的姿态角下并不一样,当转角增大时,其变化的程度会更严重,因此在小转角情况下如何获得较好的成像效果也是一个具有实际意义的问题。

利用多个电视台/广播电台作为辐射源的无源雷达成像的方法有基于直接傅里叶重构(DFR)和基于WVD^[4]的成像方法。但这些方法需将收集的极坐标表示的回波数据转换成直角坐标格式,其中必然要作插值运算,插值精度越高,成

像效果越好,但运算量越大。而且,算法对目标的累积转角要求较高,需要较大的转角才可得可识别的图像。

鉴于以上问题,本文利用处于不同视线角的电视台发射的不同载波频率的信号,提出一种针对多个电视台作照射源的无源雷达体制的算法。该算法通过将多个电视台形成的子弧形合成孔径等效综合为大孔径来对目标进行成像,它不需发射宽带信号,也不需要作插值,在电视台分布密集的区域,可对小角度转动的目标成像。

2 多电视台无源雷达成像算法

2.1 多电视台转台成像模型及理论推导

对于调频广播/电视台的发射信号,通过滤波器提取其载波分量,可获得所需的连续波照射信号。对平动分量进行补偿后,该运动目标可看成是围绕某一参考点旋转的目标,故多电视台对运动目标成像模式可以归为下述多电视台转台成像的模式。

我们先以均匀分布的多个电视台为例进行分析。假设以转台中心为原点 0 建立如图 1 所示的直角坐标系 (x, y) ,接收机固定于 y 正半轴上,其到原点的距离是 R_0 。设在转台周围的等角间隔 $\Delta\beta$ 的 N 个不同视线角 β 处,设 N 个电视台均匀分布,这里记 y 负半轴处 β 为 $-\pi$,沿逆时针方向 β 增

2005-06-14 收到, 2005-11-23 改回

国家自然科学基金(60472087)和国家部委跨行业预研基金(51407010204DZ0125)资助课题

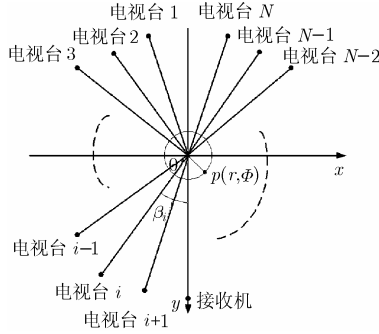


图1 多电视台转台成像模型

加。视线角为 β_i 的电视台记为电视台 i ，其相应载波波长为 λ_i ，与原点距离为 R_i ，则 $\Delta\beta = \beta_{i+1} - \beta_i$ 。设转台半径为 r_0 ，满足 $r_0 \ll R_0$ ， $r_0 \ll R_i (i=1,2,\dots,N)$ 。

以任一电视台 i 和接收机为例进行分析。设电视台 i 发射的载波信号为 $\exp(j2\pi f_i t + \psi_i)$ ，其中 $f_i = c\lambda_i^{-1}$ ， c 为光速， ψ_i 为其初始相位角。经过目标上的某一散射点 P 反射至接收机的信号为该发射信号的延迟，延迟时间 $\tau_i = (R_{i,t} + R_{0,t})c^{-1}$ ，其中 $R_{i,t}$ 为 P 到电视台 i 的距离， $R_{0,t}$ 为 P 到接收机的距离。

设 P 的散射函数为1，起始时刻坐标为 (r, Φ) ，目标每旋转 $\Delta\varphi$ 采样一次接收自各个电视台的数据，若至某时刻目标旋转 Ω 时，其瞬时坐标为 (r, Φ_Ω) ，显然 $\Phi_\Omega = \Phi - \Omega$ （ Φ_Ω 的记法与 β 一样，取值从 $-\pi$ 到 π ）。

由于 $r_0 \ll R_0$ ， $r_0 \ll R_i$ ，可认为 $R_{i,t} = R_i - r \cos(\beta_i - \Phi_\Omega)$ ， $R_{0,t} = R_0 - r \cos(-\Phi_\Omega)$ 。故接收的来自电视台 i 的回波信号为

$$\begin{aligned} F_B(\lambda_i, \beta_i, t, \Omega) &= \exp\{j2\pi f_i(t - \tau_i) + \psi_i\} \\ &= \exp\{j2\pi[f_i t - (R_{i,t} + R_{0,t})\lambda_i^{-1}] + \psi_i\} \\ &= \exp\{j2\pi[f_i t - (R_i + R_0)\lambda_i^{-1}] + \psi_i\} \\ &\quad \cdot \exp\{j2\pi\lambda_i^{-1}[r \cos(\beta_i - \Phi_\Omega) + r \cos(-\Phi_\Omega)]\} \quad (1) \end{aligned}$$

设成像期间各电视台发射信号的初始相位 ψ_i 保持稳定，那么我们可以根据各电视台发射信号载波频率的不同，将接收到的来自各电视台的回波信号分离开来，并分别解调掉式(1)中的 $\exp\{j2\pi[f_i t - (R_i + R_0)\lambda_i^{-1}] + \psi_i\}$ 分量，即得到该电视台回波中对成像有用的复包络信息：

$$\begin{aligned} F(\lambda_i, \beta_i, \Omega) &= \exp\{j2\pi\lambda_i^{-1}[r \cos(\beta_i - \Phi_\Omega) + r \cos(-\Phi_\Omega)]\} \\ &= \exp\{j2\pi[\lambda_i \sec(\beta_i/2)]^{-1}2r \cos(\beta_i/2 - \Phi_\Omega)\} \quad (2) \end{aligned}$$

式(2)是任一电视台 i 照射下目标回波的复包络。下面将各个电视台和接收机构成的双站回波等效成单站的情况来说明孔径的综合结果。

单站情况下，若雷达位于 y 轴不动，发射波长为 γ_i ，设其到原点的距离远远大于 r_0 ，坐标为 (r, Φ) 的目标旋转 θ_i 时，雷达所接收的解调后对成像有用的复包络信息是^[5]：

$$G_M(\gamma_i, \theta_i) = \exp\{j2\pi\gamma_i^{-1}2r \cos(\theta_i - \Phi)\} \quad (3)$$

而在式(2)中，若令 $\lambda_i \sec(\beta_i/2) = \gamma_i$ ，则有

$$F(\lambda_i, \beta_i, \Omega) = \exp\{j2\pi\gamma_i^{-1}2r \cos[(\beta_i/2 + \Omega) - \Phi]\} \quad (4)$$

比较式(3)和式(4)可以看出，若 $\theta_i = \beta_i/2 + \Omega$ ，有：

$$F(\lambda_i, \beta_i, \Omega) = G_M(\gamma_i, \beta_i/2 + \Omega) \quad (5)$$

式(5)表明，图1所示系统配置中，某时刻目标旋转 Ω 时，位于 y 轴的接收机所收到的波长为 λ_i 、视线角为 β_i 的电视台 i 的回波等效于位于 y 轴、波长为 γ_i 的单站雷达在目标旋转 $\beta_i/2 + \Omega$ 角度时的回波。

对于分布式目标，所接收的回波数据为所有散射点回波的总和。设该目标的散射函数为 $g(x, y)$ （其极坐标表示为 $g(r, \Phi)$ ），故目标旋转 Ω 时接收自电视台 i 的回波数据为：

$$\begin{aligned} G_B(\lambda_i, \beta_i, \Omega) &= \iint g(x, y)F(\lambda_i, \beta_i, \Omega)dx dy \\ &= \iint g(x, y)G_M(\gamma_i, \beta_i/2 + \Omega)dx dy \quad (6) \end{aligned}$$

上式的积分符号表示对所有散射点回波求和。

由(6)式可见，当目标旋转角 Ω 从0至 rot 改变时，接收到电视台 i 的各次回波数据等价于固定于 y 轴的单站雷达以波长 γ_i 观测到的目标旋转角从 $\beta_i/2$ 变至 $\beta_i/2 + \text{rot}$ 的各次回波数据。当 $\beta_i/2 + \text{rot} + \Delta\varphi = \beta_{i+1}/2$ 即 $\text{rot} = \Delta\beta/2 - \Delta\varphi$ 时，综合所有电视台的接收回波数据相当于获得单站时目标从 $\beta_1/2$ 旋转到 $\beta_N/2 + \text{rot}$ 的这样一个大转角的回波数据。

2.2 算法实现

将坐标关系 $r \sin \Phi = x$ ， $r \cos \Phi = y$ 代入式(6)，得到的电视台 i 的回波数据可写为

$$G_B(\lambda_i, \theta_i) = \iint g(x, y) \exp\{j4\pi\gamma_i^{-1}(y \cos \theta_i + x \sin \theta_i)\} dx dy \quad (7)$$

其中 $\theta_i = \beta_i/2 + \Omega$ ， $\gamma_i = \lambda_i \sec(\beta_i/2)$ 。

令 $f_x = 2 \sin \theta_i / \gamma_i$ ； $f_y = 2 \cos \theta_i / \gamma_i$ ；有：

$$f_x^2 + f_y^2 = (2/\gamma_i)^2 \quad (8)$$

则式(7)可写为

$$G(f_x, f_y) = \iint g(x, y) \exp(j2\pi(xf_x + yf_y)) dx dy \quad (9)$$

由式(8)知实际获得的电视台 i 的回波数据 $G(f_x, f_y)$ （即 $G_B(\lambda_i, \theta_i)$ 的频域表示）在频域 (f_x, f_y) 平面上半径为 $2/\gamma_i$ 的圆周上。由于实际中 $\theta_i = \beta_i/2 + \Omega$ ， Ω 从0至 rot 改变，故仅在 $2/\gamma_i$ 的谱环的视线角从 $\beta_i/2$ 到 $\beta_i/2 + \text{rot}$ 的一段圆弧上有回波数据分布，而在该谱环上的其它视线角的回波数据因无法获得相当于认为是0，如图2所示，图中实线代表数据不为0。

对式(9)作逆傅里叶变换，再转换成极坐标格式，可得到 $g(x, y)$ 在极坐标系中的估计值为^[6,7]

$$\hat{g}(r, \Phi) = \frac{2}{\gamma_i} \int_{-\pi}^{\pi} G_B(\lambda_i, \theta_i) \exp\{-j4\pi r \gamma_i^{-1} \cos(\theta_i - \Phi)\} d\theta_i \quad (10)$$

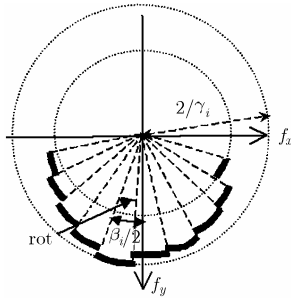


图2 多电视台反射信号在频域上的分布示意图

由式(6)和式(10), 此时利用该电视台的回波数据所得到的散射函数估计为:

$$\hat{g}_i(r, \Phi) = \frac{2}{\gamma_i} \int_{-\pi}^{\pi} G_i(\theta_i) \exp\left[-j4\pi \frac{r}{\gamma_i} \cos(\theta_i - \Phi)\right] d\theta_i \quad (11)$$

其中

$$G_i(\theta_i) = \begin{cases} G_B(\lambda_i, \beta_i, \Omega), & \theta_i = \beta_i/2 + \Omega, \quad \Omega = 0 \sim \text{rot} \\ 0, & \theta_i = \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

可恢复的点散射函数为实际的点散射函数 $g(r, \Phi)$ 和点扩散函数(PSF)的卷积^[6]。当目标不能以大转角观测时, 相当于式(12)里 $G_i(\theta_i)$ 不为0的数据较少, 利用式(11)获得的点散射函数的旁瓣较高, 分辨率较低。为了获得较好的分辨率, 我们可以通过处理多个频率(多个电视台)测得的数据来减小PSF的旁瓣。因为多个频率情况下的PSF是各个频率PSF的叠加, 我们将即所有谱环上的回波数据进行综合, 有

$$\hat{g}(r, \Phi) = \sum_{i=1}^N \hat{g}_i(r, \Phi) \quad (13)$$

式(13)表示, 所有的式(12)中的回波不为0的转角(有效转角) θ_i 被综合起来, 则可获得的目标的总转角是所有 θ_i 的并集, 相当于目标大角度转动。由式(12)表征的成像信息量大增加, 最终获得较好的散射函数估计 $\hat{g}(r, \Phi)$ 。

$\hat{g}_i(r, \Phi)$ 可具体实现为: 在图像空间, 对半径 r 和角度 Φ 等间隔采样; 对某一采样值 r , 接收数据序列 $G_i(\theta_i)$ 和 $\exp\{-j4\pi r \gamma_i^{-1} \cos \theta_i\}$ 作圆形卷积。由此, $G_i(\theta_i)$ 不需要像文献[4]中的方法那样插值到直角坐标格式中, 同时卷积可利用快速傅里叶变换(FFT)实现, 减轻了运算负担。

故本文提出的基于多电视台子孔径综合的无源雷达成像算法分下述步骤完成:

(1) 对所接收的解调后各电视台的数据, 按照公式(11)求出各自的 $\hat{g}_i(r, \Phi)$ 。

(2) 按照公式(13)求出 $\hat{g}(r, \Phi)$ 。

(3) 作归一化处理。

从合成孔径的角度来说明上述算法的实现: 当目标旋转, 接收机固定, 处理接收的采样数据 $G_B(\lambda_i, \theta_i)$, 等效于形成一个以旋转中心为圆心的弧形合成孔径, 该弧的角度等于

目标的旋转角度^[8]。因此若目标转动 360° , 式(11)可理解成一个以原点为圆心的圆形合成孔径天线, 它能对目标上的每一点进行聚焦处理, 式中的exp项用来校正每一点的回波相位使其到达圆形合成孔径天线的信号均同相(即聚焦), 由此获得所有方向的高分辨率。事实上, 由于有效转角 $\theta_i = \beta_i/2 - \beta_i/2 + \text{rot}$, 处理单个电视台 i 的回波数据等效于只形成一个位于视线角 $\beta_i/2$, 张角至 $\beta_i/2 + \text{rot}$ 的小弧形合成孔径(子孔径)。式(13)即是处理所有电视台的回波数据得到的子孔径进行综合, 综合后的孔径张角为所有子孔径张角的并集。当多个电视台均匀布站时, 若目标转角 $\text{rot} = \Delta\beta/2 - \Delta\varphi$, 所有子孔径恰好相互连接, 等效综合成一个从 $\beta_1/2$ 张角至 $\beta_N/2 + \text{rot}$ 大孔径, 如图3所示。

以上讨论均针对多个电视台均匀布站的情况。实际上当各电视台为非均匀布站时, 获得的子孔径综合方法类似, 但此时由于各电台相邻间隔角 $\Delta\beta$ 大小不一, 若记它们的最大 $\Delta\beta$ 为 $\Delta\beta_{\max}$, 当目标转角 $\text{rot} < \Delta\beta_{\max}/2 - \Delta\varphi$ 时, 如图4所示, 此时各子孔径的张角为 rot , 相邻子孔径部分交叠, 部分没有连接。与图3所示的均匀布站情况相比, 多电视台综合后的孔径张角减小, 对成像不利。若要获得相同的孔径张角, 则要求目标有更大的旋转角。所以, 与 N 个电视台均匀布站的情况相比, N 个非均匀布站的电视台获得相同的成像结果所需的目标转角要大。因此, 下面的仿真中主要分析均匀布站的情况。

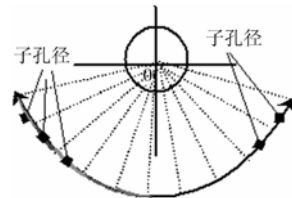


图3 均匀布站时的孔径综合示意

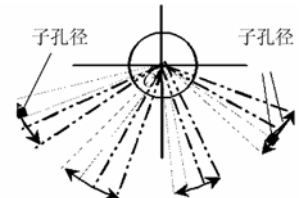


图4 非均匀布站时的孔径综合示意

3 仿真实验

在算法的具体实现中, 目标每旋转 $\Delta\varphi$ 采样一次各个电视台的数据, $\Delta\varphi$ 必须满足Nyquist采样定理。若成像区域直径为 $D(\text{m})$, 则最大 $\Delta\varphi$ (rad) 为 $\gamma_i/(2D)$ ^[7]。所以对固定 $\Delta\varphi$, $\gamma_i \geq 2D\Delta\varphi$ 。

为验证算法的有效性, 对某飞机模型上的7个散射点进行仿真试验。如图5(a)所示, 这7点的极坐标分别为 $(0, 0^\circ)$, $(8, 0^\circ)$, $(9, 120^\circ)$, $(8, -120^\circ)$, $(10, -40^\circ)$, $(7, -60^\circ)$, $(6, 120^\circ)$, 半径以米为单位。设 N 个电视台均匀布站, 即在视线角 $-168^\circ \sim 168^\circ$ 内选择 N 个电视台, 其相应的载波频率分别是 $150\text{MHz} \sim 250\text{MHz}$ 内步长为 $100/(N-1)$ MHz 的 N 个频率。目标直径40米, 每旋转 $\Delta\varphi = 1^\circ$ 采样一次接收数据。实际中能得到的目标的累积转角 rot 可能很小, 这里假设 $\text{rot} = 5^\circ$ 。下面讨论目标转角一定时电台数目的取值对成像质量的影响。

从图 2 可见, 在 360° 的角度空间中, 对电视台 i , 有效的目标转角 θ_i 仅覆盖区间 $\beta_i/2 \sim \beta_i/2 + \text{rot}$ 。由式(11)和式(13), 所有 θ_i 综合后的总转角覆盖的区间范围越广, 则综合孔径的张角越大, 对成像越有利。

利用前面的结果, 当 $\text{rot} = \Delta\beta/2 - \Delta\varphi$ 时, 相邻 θ_i 区间(或子孔径)恰好连接, 得到如图 3 所示的孔径张角, 即各 θ_i 得到最有效的利用, 此时所需要的电视台数目 N 为 29。 $N=29$ 时利用本文算法得到的重建图像如图 5(b)所示, 此时能得到较好的成像效果。

若 N 的数目增加, 虽总转角覆盖的区间范围一样大, 但数据量增大, 可对旁瓣加以抑制, 也能较好的成像。图 5(c)给出了利用 $N=34$ 个电视台所成的图像。但 N 增大, 运算量会相应增加。此时应综合考虑运算量和算法性能。

若 N 的数目不够, 总转角覆盖的区间范围减小, 同时频域上的数据量减小, 导致 PSF 的旁瓣过高而使图像的分辨率下降。图 5(d)给出了 $N=24$ 时的成像结果。

为抑制低阶旁瓣的影响, 所有结果均采用对数 $\log_2(2 \cdot \hat{g}(x, y))$ ($\hat{g}(x, y)$ 为重建的目标各点散射函数估计)的等高线显示, 图像域边长为 40m。

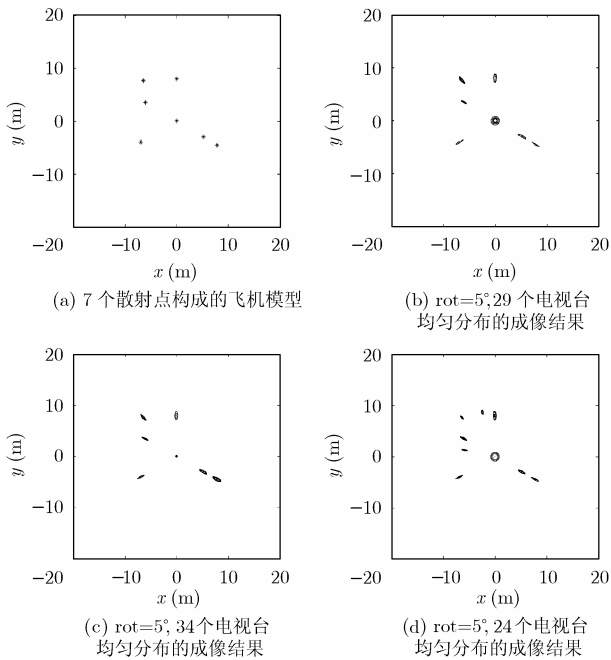


图 5 仿真目标的散射点分布及在不同电台数目下的成像结果

本文提出一种多发单收的基于多电视台子孔径合成的无源雷达成像算法, 该算法不需要发射宽带信号, 只需获得各电视台的载波信号, 即能重建高分辨的目标图像。另外, 实际中为了满足实时成像, 目标的转角通常很小, 常规雷达的分辨率因此受限。本文算法将接收的所有电视台的小转角回波数据进行综合处理, 相当于获取某单站雷达的大转角回波数据, 因此在目标转角小的情况下也可成像; 并且算法在极坐标中进行, 不需要做插值, 减轻了计算负担。该算法对于进一步设计利用电视信号作为机会照射源的无源雷达成像系统有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 严明. 利用电视调频广播载波信号的双(多)基地雷达系统. 现代雷达, 2000, 22(4): 19-24.
- Yan Ming. Bistatic (Multistatic) radar system via commercial television and FM radio signals. *Modern Radar*, 2000, 22(4): 19-24.
- [2] Howland P E. Target tacking using television-based radar. *IEE Proc.-Radar, Sonar Navig.*, 1999, 146(3): 166-174.
- [3] 刘永坦等. 雷达成像术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999: 36-91, 302-307.
- [4] Wu Yong. Investigation of passive radar imaging using wigner-ville distribution. Master dissertation, Urbana: University of Illinois, 2001.
- [5] Mensa D and Heidbreder G. Bistatic synthetic-aperture radar imaging of rotating objects. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1982, 18(4): 423-431.
- [6] 张直中. 微波成像术. 北京: 科学出版社, 1990: 166-170.
- [7] Mensa D, Halevy S, and Wade G. Coherent doppler tomography for microwave imaging. *Proc. IEEE*, 1983, 71(2): 254-260.
- [8] Mensa D, Heidbreder G, and Wade G. Aperture synthesis by object rotation in coherent imaging. *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 1980, 27(2): 989-998.

张馨文: 女, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为无源雷达成像技术。
 王 俊: 男, 1969 年生, 教授, 研究方向为无源雷达探测定位与成像技术、多传感器雷达组网和融合技术等。

4 结束语