

多频体制下虚拟阵列映射聚焦方法

赵光辉¹, 陈伯孝¹, 黄白²

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 710071, 西安; 2. 广州电信网络监控中心, 510630, 广州)

摘要: 针对常规虚拟孔径系统设计复杂、运算量大等问题,提出一种多载频体制下虚拟孔径阵列合成方法——映射聚焦法. 该方法利用了频率分集的思想,通过对不同载频接收回波的导向矢量进行推导,将频率分集与空间分集相互结合,得到了空域目标的非等间隔采样,为方便常规超分辨方法的广泛推广,通过宽带映射聚焦方法,将非等间隔空域采样转换为空间均匀采样回波,得到了等距半波长下的虚拟接收阵列. 有别于传统的阵列插值以及基于高阶累计量的虚拟孔径方法,映射聚焦方法通过简单的插值运算,就可以得到较好的虚拟阵列回波. 对不同参数下单目标俯仰角参量估计的仿真结果表明,与传统虚拟孔径方法相比较,映射聚焦法比常规的高阶累积量方法在测角精度上提高了近 15 dB.

关键词: 虚拟孔径;映射聚焦;频率分集

中图分类号: TN958 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)04-0066-04

New Mapping Focus Method for Virtual Array under Multiple Carrier-Frequency

ZHAO Guanghui¹, CHEN Baixiao¹, HUANG Bai²

(1. National Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Network Surveillance and Inspection Centre of Guangzhou Telecom, Guangzhou 510630, China)

Abstract: Since the design of the conventional virtual aperture is too complicated, and the calculation is too expensive, a virtual aperture array synthesis method (mapping focus method, MFM) based on multiple carrier-frequency is proposed. The method makes use of the idea of frequency diversity, which deduces the direction vectors of different carrier-frequencies to combine frequency diversity and the space diversity for achieving the spatial non-uniform sampling echo. In order to make it more convenient for the generalization of the conventional super resolution algorithms, the MFM method is utilized to change the target echo from the non-uniform sampling to uniform sampling. The virtual array of half wavelength are obtained finally. The proposed method differs from the conventional array interpolation and the virtual aperture study based on higher order accumulations, it only utilizes the simple interpolation to achieve better virtual array echo. Simulations on the elevation estimation of different parameters show that under the same circumstance, the MFM can improve 15 dB in the angle estimation precision, compared with the conventional virtual aperture methods based on higher order accumulations.

Keywords: virtual aperture; mapping focus method; frequency diversity

常规单脉冲测角^[1]由于阵列孔径固定,其角度分辨率及测角精度受到 Rayleigh 限的制约,因而无法区分同一波束内的多目标. 为突破 Rayleigh 限, Dogan 和 Mendel^[2-4]提出了基于信号高阶累计量的

收稿日期: 2008-06-26. 作者简介: 赵光辉(1980—),男,博士生;陈伯孝(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60772068);教育部优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0856).

虚拟阵列扩展方法,从物理意义的角度分析了高阶累计量具有不损失方向信息的阵元合成功能,并提出了虚拟互相关计算方法,但该方法的计算复杂度,不利于雷达信号的实时处理. Friedlander 等^[5-6]将阵列插值应用到波达方向估计中,解决了非均匀阵列角度测量的模糊问题,但是并没有改善阵列的分辨率. 为解决阵列分辨率较低的问题,近年来涌现出许多基于宽带信号理论的波达方向估计^[7-8]方法,但这些方法只适用于高分辨雷达,对于低分辨雷达而言,其广泛应用仍存在问题. 本文针对低分辨雷达分辨率较低的问题,提出了一种虚拟阵列孔径扩展的新方法,通过发射不同的载频信号,在接收端通过阵元位置转换,得到了虚拟的扩展阵列. 与传统的虚拟阵列构造方法相比,本文方法具有更低的设计复杂度及较高的角度测量精度.

1 多载频接收阵回波模型

假设阵列为半波长等距分布的 N 元线阵,若空间存在 p 个目标,分别从 θ_i 方向入射到阵列, $i=1, 2, \dots, p$, 则阵列接收回波为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{S}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$ 为接收阵列回波,其中 $x_l(t)$ 为第 l 个阵元的回波复包络, $l=1, 2, \dots, N$; $\mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_p)]$ 为入射信号的方向矩阵, $\mathbf{a}(\theta_i) = [a_1(\theta_i), a_2(\theta_i), \dots, a_N(\theta_i)]^T$ 为 θ_i 方向的导向矩阵, $\mathbf{a}_m(\theta_i) = \exp[j2\pi d/(m-1)\sin(\theta_i)\lambda_0]$ 为第 m 个阵元在 θ_i 方向的导向矢量, $m=1, 2, \dots, N$; $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_p(t)]^T$ 为信号源复包络; $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T$ 为互不相关的 0 均值高斯白噪声矩阵. 令阵元间距 d 为半波长,即 $d = \lambda_0/2 = C/(2f_0)$, C 为光速, f_0 为中心载频,对于不同的载频回波(如载频 f_k),其接收导向矢量为

$$\begin{aligned} a'_m(\theta_i) &= \exp\left(j2\pi \frac{d}{\lambda_k} (m-1) \sin(\theta_i)\right) = \\ &= \exp\left(j2\pi \frac{d}{\lambda_0} \frac{\lambda_0}{\lambda_k} (m-1) \sin(\theta_i)\right) = \\ &= \exp\left(j2\pi \frac{d}{\lambda_0} \frac{f_k}{f_0} (m-1) \sin(\theta_i)\right) = \\ &= \exp\left(j2\pi \frac{\epsilon_k d}{\lambda_0} (m-1) \sin(\theta_i)\right) = \\ &= \exp\left(j2\pi \frac{d'_k}{\lambda_0} (m-1) \sin(\theta_i)\right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $d'_k = \epsilon_k d = (f_k/f_0)d$ 为变频后的等效阵元间距,其中 $\epsilon_k = f_k/f_0$ 为发射载频 f_k 时接收阵列孔径

扩展因子. 若 $f_k > f_0$, 即 $\epsilon_k > 1$, 则 $d'_k > d$. 由此可见,发射不同载频信号,在接收端等效于阵列孔径得到了扩展. 在此结合时域采样理论对其进行阐述. 常规时域采样是将时间轴转变到距离域,理想情况下采样率越高,等效距离分辨率就越高,测距精度也就越高. 同理,对于空域采样来说,阵列天线的等距分布等效于时域等间隔采样,即天线个数越多,空域目标的回波采样个数就越多,进而可以提高角度域分辨率及测量精度. 然而,实际情况中由于天线个数有限,因此限制了空间采样数量,进而约束了目标在空间(方位、俯仰)二维角度的分辨率. 通过式(2)可以发现,多载频回波在接收端可以等效于变孔径接收回波,即通过载频的不同选取而得到扩展的阵列孔径. 如果发射载频间隔随机变化,则空间阵元间距 d' 呈非均匀随机分布. 图 1 为虚拟孔径扩展示意图,其中横坐标表示天线排放位置,纵坐标表示按高度排列不同载频的天线位置. 由图 1 可见,变换载频后,接收阵列的相对间距发生了变化,由于仿真中 $f_k > f_0$, 即 $d'_k > d$, 因此接收阵列在保持阵元个数不变的情况下,孔径得到了扩展. 当载频为 f_4 时,由图 1 可见,各阵元间距已经远大于半波长,采用常规阵列谱估计进行处理会产生很严重的测角栅瓣,因此有必要将各路载频的接收回波联合进行融合处理.

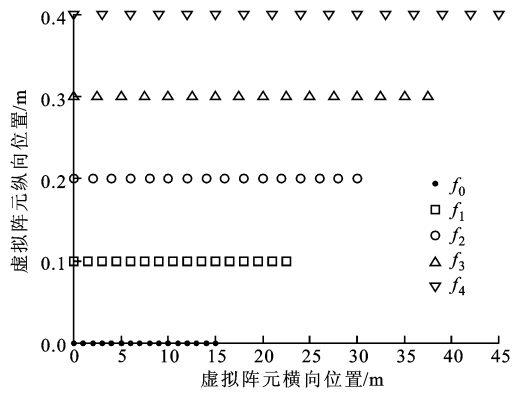


图1 虚拟孔径扩展示意图

如果将图 1 中所有阵元的位置联合绘制在一起,剔除位置重复点,对所有阵元位置进行排序,则可以得到一个非均匀排列的阵列天线. 若发射载频个数为 M ,则阵列位置排序后的接收回波为

$$\mathbf{X}_\Sigma(t) = \mathbf{A}_\Sigma(\theta)\mathbf{S}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{A}_\Sigma(\theta) = [\mathbf{a}_\Sigma(\theta_1), \mathbf{a}_\Sigma(\theta_2), \dots, \mathbf{a}_\Sigma(\theta_p)]$ 为非均匀阵的导向矩阵,其中 $\mathbf{a}_\Sigma(\theta_i) = [\mathbf{a}'_1(\theta_i), \mathbf{a}'_2(\theta_i), \dots, \mathbf{a}'_L(\theta_i)]$ 为 θ_i 方向的非均匀阵的导向矢量, $\mathbf{a}'_n(\theta_i) = \exp[j2\pi d/\lambda_0 (n-1) \sin(\theta_i)]$ 为非均匀阵中

第 n 个阵元在 θ_i 方向的导向矢量, $n=1, 2, \dots, L$, $L=\epsilon_{\max}N$ 为孔径扩展后的最大阵元个数, $\epsilon_{\max}$ 为最大孔径扩展因子. 上式的接收回波, 实部为 p 个正弦波的叠加. 由于发射载频的不同导致接收阵元间距变化, 因此图 2 给出的回波实部为空域非均匀采样结果.

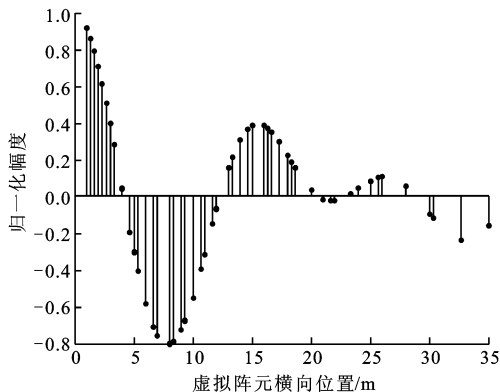


图 2 虚拟阵元回波

2 多频体制下虚拟孔径映射聚焦方法

多频发射体制下, 接收回波为非等间隔采样, 对于任意方向的目标回波, 可以通过映射聚焦将其转换为等间隔采样情况下的空域回波信号. 根据导向矩阵最小化匹配准则, 可以得到如下的映射矩阵^[5-6]

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}_{k0}(\theta) &= \mathbf{T}_A \mathbf{A}_k(\theta) \\ \min_{\mathbf{T}(k, \theta)} \|\mathbf{A}_{k0}(\theta) - \mathbf{T}_A \mathbf{A}_k(\theta)\|_F \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{A}_{k0}(\theta)$ 为第 k 个角度域^[5] 实际天线对应的导向矩阵; $\mathbf{A}_k(\theta)$ 为第 k 个角度域半波长等距布阵对应的导向矩阵, k 为对整个空域进行角度区域划分的数量; $\|\cdot\|_F$ 为 Frobenius 范数. 通过伪逆方法可以得到变换矩阵

$$\mathbf{T}_A = \mathbf{A}_{k0}(\theta) \mathbf{A}_k^{\dagger}(\theta) \quad (5)$$

式中: $\dagger$ 为伪逆符号. 式(4)也可以通过 Frobenius 范数进行求解, 其约束最小范数解为

$$\mathbf{T}_A = \mathbf{V} \mathbf{U}^H \quad (6)$$

式中: $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{V}$ 分别为对 $\mathbf{A}_k(\theta) \mathbf{A}_{k0}^H(\theta)$ 进行奇异值分解得到的左右奇异值矩阵. 将各载频接收阵列位置进行排序, 得到合成前非均匀采样信号 $\mathbf{x}$. 通过映射聚焦, 可以得到均匀采样回波

$$\mathbf{y} = \mathbf{T}_A \mathbf{x} \quad (7)$$

对于多目标回波, 由上式得到的虚拟回波可以表示为

$$y_i = \sum_{k=1}^p \alpha_{ik} \exp j\varphi_{ik} + n_i \quad i \in 1, 2, \dots, L \quad (8)$$

式中: α_{ik} 、 φ_{ik} 分别为第 i 路天线接收的第 k 个目标回波信号的幅度与相位. 由于噪声经过映射聚焦处理后变为非高斯白噪声, 因此需要先对插值聚焦后的回波进行预白化处理方能进行如下流程. 为减少接收噪声对插值处理性能的影响, 可令 $z_i = \exp j\varphi_{ik}$, 则目标角度、幅度信息可以通过求解式(8)得到. 具体过程为首先将数据 y_i 按照 Hankle^[9] 矩阵形式排列

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_{L-1} \\ y_2 & y_3 & \cdots & y_L \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{L-k} & y_{L-k+1} & \cdots & y_L \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: k 一般取 $L/2$ ^[9]. 对矩阵 $\mathbf{S}$ 进行奇异值分解, 将得到的噪声子空间带入 Root-MUSIC^[10-11] 算法, 可以得到与噪声子空间相对应的多项式根. 由特征结构类算法^[10-11] 可知, 该根即为包含信号相位信息的导向矢量 z_i , 进而可以得到目标幅度 $\hat{\alpha}_{ik}$ 与角度相位 $\hat{\varphi}_{ik}$, 将估计参量带入式(8), 可以得到估计的虚拟孔径回波信号.

3 计算机仿真结果

为验证本文孔径扩展的有效性和理论分析的正确性, 进行了如下的计算机仿真实验. 假设采用 16 个阵元且收发共用, 各阵元同时辐射不同载频的线性调频信号, 调频带宽为 500 kHz, 频差为 30 MHz, 信噪比为 20 dB, 发射基频为 100 MHz. 为检验角度测量精度, 首先对单个目标的角度进行了测量. 假设目标距离 100 km, 俯仰角为 3.4° , 图 3 为采用文献[12]方法与本文方法的结果对比. 由图 3 可见, 经过映射聚焦得到的虚拟阵元, 实现了阵列孔径的扩展, 其分辨率得到了极大的改善.

为验证本文方法对多目标测量的有效性, 仍采用 16 个收发共用天线对多个相干源的俯仰角 (-3.8° 、 -1.8° 、 -1.1° 、 1.2° 、 2° 、 3.9°) 进行超分辨率测量, 相干系数均为 0.9, 假设目标距离均为 100 km, 时域采样 100 次, 信噪比为 20 dB. 图 4 为采用文献[12]方法与本文方法的结果对比. 由图可见, 16 根阵元采用文献[12]方法无法分辨多个相干源信号, 而经过本文方法处理, 其测角精度及分辨率得到了明显的改善, 可以很精确地区分各个目标的俯仰角.

为验证本文方法在不同信噪比、不同目标角度下角度测量的稳健性以及有效性, 进行了如下的

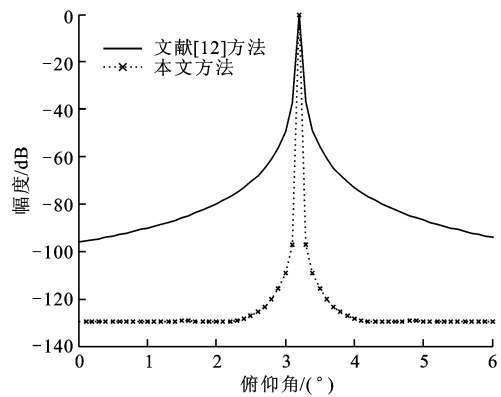


图 3 单目标分辨率分析

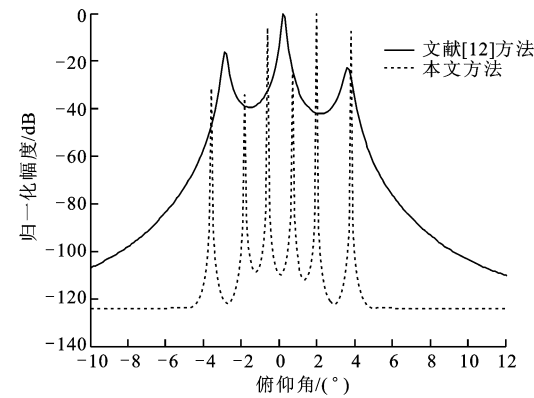


图 4 多目标相干回波分辨率分析

Monte-Carlo 实验分析. 目标角度固定为 1.3° , 调频带宽为 500 kHz, 频差为 20 MHz, 实际天线数为 16 根. 图 5 为采用文献[13]方法与本文方法进行角度测量的结果. 由图 5 可以看出, 经过映射聚焦处理的虚拟阵列同波在测角测试及性能稳健性上均有很大的提高.

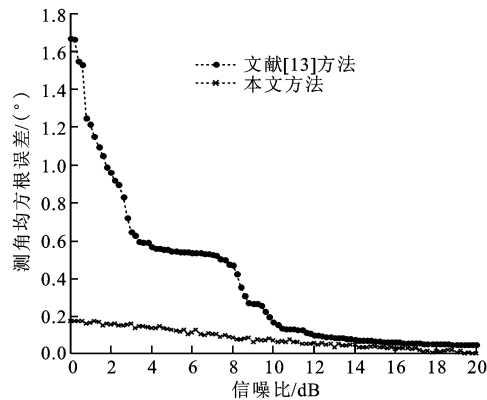


图 5 不同信噪比下的测角均方根误差

为验证文中方法对不同角度下目标角度测量的

可靠性,进行了如图 6 所示的 Monte-Carlo 实验分析,其中目标距离为 100 km,信噪比为 20 dB,目标角度由 0° 变化到 20° ,低仰角区($0^{\circ} \sim 5^{\circ}$)引入了多径回波,其他角度没有考虑多径回波影响. 由仿真结果可以看出,同一仿真环境下,本文方法的测角精度较高阶累积分方法有近 15 dB 的提高,进一步验证了本文方法的可行性与理论推导的正确性.

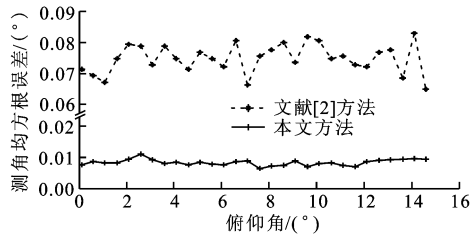


图 6 不同俯仰角下的测角均方根误差

4 结束语

本文提出了一种多频体制下虚拟阵列扩展的新方法——映射聚焦法,并对新方法在角度测量、分辨率等方面的性能进行了详细的分析. 不同于常规的基于高阶累积分量的虚拟孔径扩展方法,本文方法通过映射聚焦变换,将多频下非等间隔空域采样回波转变为等间隔空域信号,有效地扩展了阵列孔径,提高了角度测量的分辨率. 仿真结果证明了本文的映射聚焦方法在测角精度及稳健性等方面的有效性.

参考文献:

[1] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1995:197-200.

[2] DOGAN M C, MENDEL J M. Applications of cumulants to array processing, part I: aperture extension and array calibration [J]. IEEE Trans on SP, 1995, 43(5):1200-1216.

[3] CHEVALIER P, ALBERA L, FERREOL A. On the virtual array concept for higher order array processing [J]. IEEE Trans on SP, 2005, 53(4): 1254-1271.

[4] CHEVALIER P A. On the virtual array concept for the fourth order direction finding problem [J]. IEEE Trans on SP, 1999, 47(9): 2592-2595.

[5] FRIEDLANDER B. The interpolated root-music algorithm for direction finding [J]. Signal Processing, 1993, 30(1):15-29.

[6] WEISS A J, FRIEDLANDER B. Performance analysis of diversely polarized antenna arrays [J]. IEEE Trans on SP, 1991, 39(7): 1589-1603.

[7] 张安学,蒋延生,汪文秉. 探地脉冲雷达回波信号波

- 达方向估计方法的研究[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(8):843-846.
- ZHANG Anxue, JIANG Yansheng, WANG Wenbing. Direction of arrival estimation of pulse signal for ground penetrating radar [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(8):843-846.
- [8] 金梁,王文杰,蒋伯峰,等. 宽带信号广义谱相关子空间拟合二维来波方向估计[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(12):15-19.
- JIN Liang, WANG Wenjie, JIANG Bofeng, et al. Two-dimensional direction of arrival estimation of broadband signals via generalized spectral correlation signal subspace fitting [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(12): 15-19.
- [9] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [10] ZOLTOWSKI M D, KAUTZ G M, SILVERSTEIN S D. Beam-space root-music [J]. IEEE Trans on SP, 1993, 41(1): 344-364.
- [11] RAO B D, HAIR K V S. Performance analysis of root-music [J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989, 37(12):1939-1949.
- [12] KWONBH P. Forward/backward spatial smoothing techniques for coherent signal identification [J]. IEEE Trans on ASSP, 1989, 37(1):8-15.
- [13] ROY R, PAULRAJ A, KAILATH T. ESPRIT: a subspace rotation approach to estimation of parameter of cisoids in noise [J]. IEEE Trans on ASSP, 1986, 34(5):1340-1342.

(编辑 刘杨)