

基于FFT的数字多波束测向算法研究

龙 宁, 张凤荔

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】低信噪比下的高精度DOA估计是信号处理中的一个难点,传统的DOA测量方法和现代空间谱估计算法只适用于高信噪比环境。该文将传统的振幅测向法、数字多波束形成和FFT相结合,提出了一种基于频域处理的振幅测向算法,仿真实验表明该算法在信噪比为0~-25 dB的噪声环境中可以进行高精度DOA估计。

关键词 DOA估计; 多波束形成; 快速傅里叶变换; 低信噪比; 无源雷达

中图分类号 TN927

文献标识码 A

A Digital Multi-Beams Algorithm of DOA Estimation Based on FFT

LONG Ning, ZHANG Feng-li

(School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract High accuracy estimation of DOA(Direction of Arrival) in low SNR (Signal-Noise-Ratio) is a intractable problem in signal processing. Traditional methods of DOA estimation and modern space spectrum estimation algorithms can be only effectively used in high SNR. In this paper, classical amplitude-method of DOA estimation, digital multi-beams forming and FFT are integrated, and a amplitude-algorithm of DOA estimation by processing in frequency domain is put forward. Simulation results show that the algorithm can estimate DOA effectively when SNR is 0~-25 dB.

Key words estimation of DOA; multi-beams forming; FFT; low SNR; passive radar

传统的有源雷达由于受到电子侦察、电子干扰、隐形飞行器和反辐射导弹的威胁已不能满足现代电子战的要求,基于非合作性照射源的无源雷达由于具有反电子侦察与电子干扰、反隐身、反反辐射导弹等优点,因此受到世界各国的密切关注并成为一个研究热点^[1,2],而低信噪比下的DOA估计是此类系统的关键技术之一。传统的DOA测量方法有相位法和振幅法,其空间分辨力完全由阵列孔径或天线图尖锐程度决定,因此它们的精度和分辨力都不高;以MUSIC^[3]、ESPRIT、TLS-ESPRIT^[4]、Root-MUSIC^[5]、Beamspace Root-MUSIC^[6]、Beamspace ESPRIT^[7]为代表的空间谱估计算法具有极高的分辨力和优良的测角精度,同时可以保证空间覆盖范围,空间谱估计算法具有对入射信号到达角估计的渐进无偏性和超分辨特性,可以用于高密度信号环境下无线电测向。当目标反射信号处于信噪比为-10~-30 dB的噪声环境中时,传统的DOA测量方法和空间谱估计算法的性能都将极大降低或基本失效;高阶累积量算法和循环谱估计具有更低的信噪比要求,但真正在这样低的信噪比下能够进行实时处理的有效算法迄今为止还未见公开报道。为此,本文提出一种低信噪比下的DOA估计算法。

1 数字多波束测向

传统的振幅法测向根据测向天线系统侦察信号的相对幅度大小来确定信号的到达方向,数字波束形成作为振幅法测向提供了更广泛的应用范围。设一个由M个阵元组成的均匀线阵,且阵元间距为d。当入射角为 θ

收稿日期: 2004-05-13

作者简介: 龙宁(1978-),男,硕士生,主要从事信号检测与估计、雷达信号处理、神经网络、ASIC技术等方面的研究。

的单位平面波入射到线阵时, 入射信号响应向量 $\mathbf{a}(\theta) = [1 \ e^{-j\varphi} \ \dots \ e^{-j(M-1)\varphi}]^T$, $\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$, λ 为入射信号波长。若有 K 个波束, 第 k 个波束的权向量或控制向量 $\mathbf{w}_k = \mathbf{a}(\theta_k) = [1 \ e^{-j\varphi_k} \ \dots \ e^{-j(M-1)\varphi_k}]^T$, $\varphi_k = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_k$, $\theta_k = \theta_0 + (k-1)\Delta\theta$, $k = 1, 2, \dots, K$, 则第 k 个波束的幅度波束图为:

$$F_k(\theta) = |\mathbf{w}_k^H \mathbf{a}(\theta)| = \left| \sum_{m=1}^M e^{-j(m-1)(\varphi - \varphi_k)} \right| = \left| \frac{\sin[M(\varphi - \varphi_k)/2]}{\sin[(\varphi - \varphi_k)/2]} \right|$$

为了不在空间角度为 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 内出现栅瓣, 应有 $d/\lambda < 1/(1 + |\sin \theta_k|)$ 。由于波束图的第一副瓣点平很高, 可以采用加窗处理用以降低副瓣, Hamming窗的最大副瓣电平为 -43 dB (未加窗时约为 -13.4 dB), 因此应用较广泛。虽然波束主瓣半功率点宽度较宽(未加窗时 $\theta_B = 50.8\lambda/Md$ (度)), 但利用多波束测向的测向精度只取决于相邻波束指向的间距, 即 $\Delta\theta$, 而与 θ_B 无关。这种振幅法直接测向实际上是时域处理, 对信噪比的要求很高, 对于信噪比为 $-10 \sim -30$ dB 的噪声环境中的信号根本无法进行检测和DOA估计。从另一个角度来看, 由于频域处理对噪声有很强的抑制作用, 因此基于频域处理的多波束测向算法将可能突破传统的振幅法测向的限制, 而成为低信噪比下测向的一种有效途径。

为了检测出低信噪比环境中目标信号的到达角, 可以将 N 个样本点经过 K 个波束的输出分别进行FFT处理, 利用CFAR算法进行目标检测。当判定第 $k, k+1, \dots, k+L-1$ 个波束的输出有目标时, 利用基于时域处理的振幅测向算法原理, 可以判定若第 l 个波束输出的信号FFT的幅度最大, 则第 l 个波束指向即为目标信号的DOA, $l \in \{k, k+1, \dots, k+L-1\}$, $L \in \{1, 2, \dots, K\}$, 且 $L \leq K - k + 1$, 该算法如图1所示。若波束扫描范围在 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 内, 由于 K 个波束指向范围 $K\Delta\theta$ (度), 则经过 $180/K\Delta\theta$ 次波束扫描即可覆盖全空间。理论上, 当 $K\Delta\theta$ 等于波束主瓣宽度时, DOA估计的精度就可以完全不受主瓣宽度的影响。

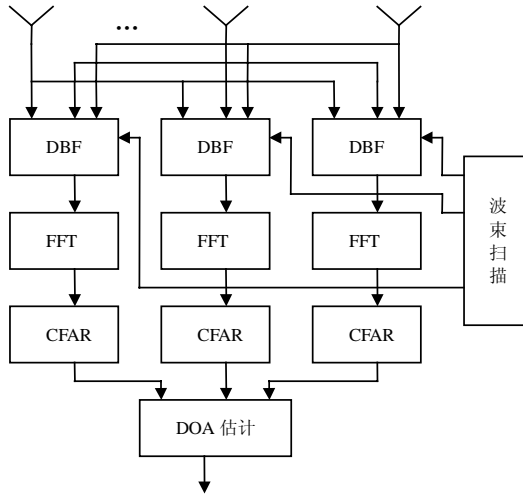


图1 基于FFT的多波束DOA估计

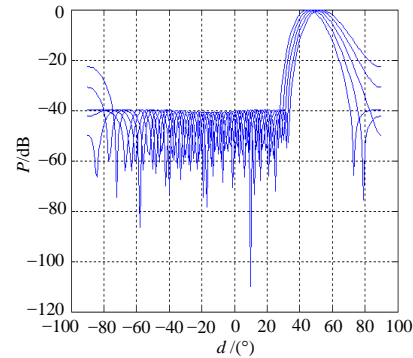


图2 采用Hamming加权的5个波束图

值得注意的是, 波束进行扫描时伴随有波束展宽效应, 这将影响上述恒定波束个数的DOA估计精度。一种有效的改进算法就是采用可变波束数目的DOA估计, 即根据不同扫描角度时波束的宽度确定相应的波束数目, 这样即考虑了估计精度, 又兼顾了实际硬件开销; 另一种方法就是减小波束扫描范围, 采用多个阵列实现全空间扫描, 在减小波束扫描范围的同时采用可变波束数目的DOA估计, 这样就进一步降低了硬件要求。例如, 与线阵法线方向波束相比, 当波束扫到 $\pm 60^\circ$ 时波束将展宽为原来的2倍, 所以在 $\pm 60^\circ$ 的扫描范围内采用可变波束数目进行DOA估计所需的软件硬件开销是可以接受的。

2 仿真结果

为验证基于FFT的数字多波束测向算法的有效性, 本文做以下仿真实验。一个由16个阵元组成的均匀线

阵, 5个数字波束, 波束扫描范围为 $-60^\circ \sim +60^\circ$, 波束间距 $\Delta\theta = 2^\circ$ 。当 $\theta_0 = 45^\circ$ 时, 采用Hamming窗处理后的波束图如图2所示。当样本数 $N = 20\ 000$ 时, 采用Hamming窗处理以降低波束副瓣, 经过100次 Monte-Carlo 实验得出以下结果: 1) $\Delta\theta = 1^\circ$, $M = 16$, 信噪比SNR-DOA估计均方根误差关系曲线如图3所示, 结果表明, 在信噪比为 $0 \sim -25$ dB的噪声环境中该算法可以有效进行信号的DOA估计; 2) $\Delta\theta = 1^\circ$, SNR = -20和SNR = -25 dB时的阵元数M-DOA估计均方根误差关系曲线见图4、图5。该结果表明, DOA估计误差随着阵元数的增加而减小, 并且阵元数不变时, 信噪比越高, DOA估计误差越小, 这与理论分析是一致的。当SNR = -30 dB时, 要检测出弱信号所需的样本数很大, FFT计算量较大, 就目前硬件水平来看不易进行实时处理, 故未给出仿真结果。

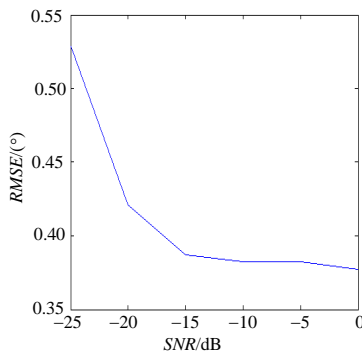


图3 SNR-DOA估计均方根误差关系曲线

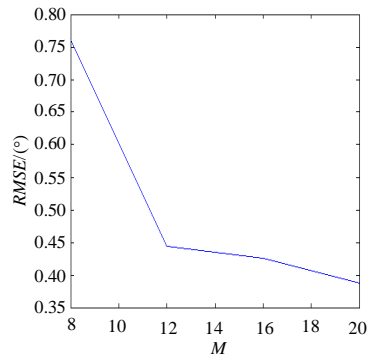


图4 阵元数M-DOA估计均方根误差关系曲线(SNR=-20 dB)

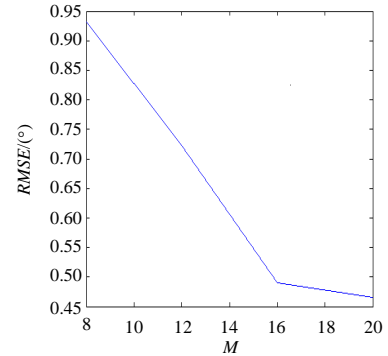


图5 阵元数M-DOA估计均方根误差关系曲线(SNR=-25 dB)

3 结束语

针对基于非合作性照射源的无源雷达中的弱信号检测问题之一——DOA估计, 本文提出了一种基于FFT的数字多波束测向算法, 仿真实验表明该算法在信噪比为 $0 \sim -25$ dB的噪声环境中可以进行高精度DOA估计。该方法具有简单、低计算量, 易于实时处理等优点, 更适用于低信噪比环境中的DOA估计, 与传统的振幅测向法一样, 该算法不能对同时到达的多信号进行测向和分辨, 这是其不足之处, 对于如何提高其多信号分辨能力还需做进一步研究。此外, 这种无源相干定位系统中还有很强的多径干扰, 必须采取相应措施抑制其多径干扰才能有效地实现弱信号检测和DOA估计, 这也是无源雷达的又一个难点, 实际上, 强干扰中的弱信号检测是无源雷达与有源雷达信号处理最根本的区别。

参 考 文 献

- [1] Howland P E. Target tracking using television-based bistatic radar [J]. IEEE Proc Radar Sonar Navigation, 1999, 146 (3): 166-174
- [2] 曲长文, 何友. 基于电视或调频广播的非合作式双(多)基地雷达及关键技术[J]. 现代雷达, 2001, 23(1): 19-23
- [3] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Trans-AP, 1986, 34(3): 276-280
- [4] Roy R, Kailath T. ESPRIT- estimation of signal parameters via rotational invariance techniques [J]. IEEE Trans-ASSP, 1989, 37(7): 984-995
- [5] Rao B D, Hari K V S. Performance analysis of Root-MUSIC [J]. IEEE Trans-ASSP, 1989, 37 (12): 1 939-1 949
- [6] Zoltowski M D, Kautz G M, Silverstein S D. Beam-space Root-MUSIC [J]. IEEE Trans-SP, 1993, 41 (1): 344-364
- [7] Xu Guanghan, Silverstein S D, Roy R, Kailath T. Beam-space ESPRIT [J]. IEEE Trans-SP, 1994, 42 (2): 349-356