

· 学术论文与技术报告 ·

米波雷达方位角超分辨外场实验研究*

何子述** 黄振兴 向敬成

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】 介绍了一个由均匀线接收阵和米波雷达组成的外场实验系统, 用于进行米波雷达的方位角超分辨实验。用采集的实验数据对几种常用的超分辨算法进行了实验, 结果表明, FBLP 算法和 ESPRIT 算法可清晰分辨出角间隔为 0.2~0.3 波束宽度的两架飞机。

关键词 米波雷达; 超分辨; 外场实验; DOA 估计

中图分类号 TN971.2; TN911.72

米波雷达的方位角超分辨具有广阔的应用前景, 当信号源(通常是两架飞机)的 DOA(Direction of Arrival)均位于米波雷达阵列天线的主瓣内时, 由于受 Raleigh 角分辨准则的限制, 采用传统方法无法将其分辨开。借助于近代谱估计及阵列信号处理算法可突破端利限, 实现角度超分辨。

目前, 受到人们广泛关注的角度超分辨算法有: 最大熵/线性预测法(包括 FBLP)^[1]、基于信号空间相关矩阵特征分解的子空间法(包括 MUSIC 法, 最小范数法)^[2,3]、ESPRIT 算法^[4]、基于高阶累积量(通常是四阶)特征分解的 MUSIC 法等^[5,6]。另外, MSLC 系统也具有角度超分辨的性能^[7]。

为了研究算法在实际工程中的性能, 除了必须的理论分析外, 对一些无法用准确的数学模型进行描述的实际非理想因素, 用外场实验的方法最能客观反映处理算法的实际应用性能。S.Haykin 曾在加拿大的 Huron 湖, 用 32 元阵实验系统, 研究低角跟踪雷达的角度超分辨性能, 实验的目的是实现信号源及其关于湖面镜像的角度超分辨^[8]。

本文充分利用了以米波雷达为中心的实验系统对空观察的实验数据, 研究超分辨算法对空中目标(通常是民航飞机)的方位角超分辨性能。

1 实验系统构成

方位角超分辨外场实验系统组成如图 1 所示, 主要由两部分组成: 一部完整的米波段雷达, 一套四阵元四通道线接收阵。将四阵元线接收阵置于距离雷达天线 200 m 处, 两者同步旋转。并设置一双应答式信标源, 用于模拟空间目标, 以便对实验系统进行调整、校准和设置参考方向。四阵元中的每个阵元由上、下两排共 6 个半波振子并馈组成, 其主要性能参数为:

工作频率	P 波段	阵元间距	4.19 m
水平口面尺寸	16.75 m	阵元数	4
和波束宽度	8°	天线转速	(2°~3°)/s
中频	6 MHz	正交采样频率	8 MHz
A/D	8 位		

在进行实验时, 首先录取无目标时的接收机通道噪声, 用于计算有目标时采集数据的信噪比。在采集录存目标数据时, 由雷达进行对空观察, 当发现空中两目标(通常为民航飞机)位于同一距离单元、且在方位上接近时, 便作好采集录存准备。一旦两目标在雷达的 PPI 上重迭, 即在方位角上不能分辨, 便立刻对数据进行采集存贮, 进而存盘, 供事后脱机处理。

1999年6月23日收稿

* 国防科技预研基金和电子部预研基金资助项目

** 男 37岁 硕士 副教授

对图 1 所示的实验系统所录存的数据进行方位角超分辨率处理前, 首先应对数据进行旋转补偿,

以消除天线阵元旋转的影响, 然后对数据进行通道一致性补偿, 以消除各接收通道间的幅相不一致性。

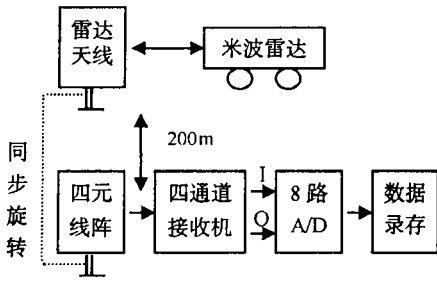


图 1 方位角超分辨外场实验系统

2 方位角超分辨率实验算法

对图 1 所示的实验系统所录存的实验数据, 本文拟用 FBLP 算法、MUSIC 算法、MNM 算法、ESPRIT 算法及基于高阶累积量特征分解的 HC-MUSIC 算法进行研究, 为此, 对信号模型和各种算法作简单描述。

考虑一个 M 元均匀线阵, 设有 $N(N < M)$ 个互不相关的窄带信号源平面波辐射到线阵上, 在第 k 次快拍, 得到的数据向量为

$$X(k) = AS(k) + n(k) \quad k = 1, 2, \dots, k \quad (1)$$

式中 $X(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_M(k)]^T$ 为 M 个阵元输出, $A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_N)]$, $a(\theta_i) = [1, e^{-j\phi}, \dots, e^{-j(M-1)\phi}]^T$, $\phi_i = (2\pi d/\lambda) \sin \theta_i$ 。其中 T 为转置, λ 是载波波长, d 为阵元间距 $i=1, 2, \dots, N$ 。 $S(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_N(k)]^T$, $s_i(k)$ 为第 i 个平面波的复振幅。 $n(k) = [n_1(k), n_2(k), \dots, n_M(k)]^T$, $n_i(k)$ 为零均值、方差为 σ^2 的白噪声, 且与信号源不相关。 k 为快拍次数。

2.1 FBLP 算法

该方法是将 M 个阵元输出看成 M 阶对空域滤波的横向滤波器, 其权向量 $W = [1, W_1, W_2, \dots, W_{M-1}]^T$, 借助于对数据矩阵的奇异值分解, 可得权向量 W 的最小二乘解, 因此 FBLP 算法的空间扫描谱为^[1]

$$P_{\text{FBLP}}(\theta) = 1/|W^H a(\theta)|^2 \quad (2)$$

其中 $a(\theta)$ 为方向向量, $a(\theta) = [1, e^{-j\phi}, \dots, e^{-j2\phi}, \dots, e^{-j(M-1)\phi}]^T$, 且 $\phi = (2\pi d/\lambda) \sin \theta$ 。搜索出 $P_{\text{FBLP}}(\theta)$ 中的 N 个最大峰值, 其对应角位置便是 N 个信号源的 DOA 角。

2.2 MUSIC 算法和 MNM 算法

根据式(1)得到的 k 次快拍的接收数据, 可以估计出阵输出的空间相关矩阵 \hat{R} , 对 \hat{R} 进行特征分解, 可得 \hat{R} 的信号子空间 E_S 和噪声子空间 E_N , 利用信号方向向量 $a(\theta)$ 与噪声子空间正交的方法来构造空间扫描谱, 即 MUSIC 算法^[2]

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta) = 1/\|a^H(\theta) E_N\|^2 \quad (3)$$

MNM 算法则是利用信号方向向量与噪声子空间 E_N 中一个向量 e 来构造空间扫描谱, 具体计算时要求 e 的第一个元素为 1, 且其范数最小^[3]

$$P_{\text{MNM}}(\theta) = 1/|e^H a(\theta)|^2 \quad (4)$$

2.3 ESPRIT 算法

ESPRIT 算法是将接收阵列分成间距为 Δ 的两个子阵, 由于从不同方向的信号源到达两子阵间的波程差不同, 进而使得到达两子阵间的相位差 γ_i 不同, 求得相位差 γ_i 后, 便可容易解出信号 DOA 角度 θ_i 。利用基于总体最小二乘技术的特征分解方法可方便地求得相位差 γ_i , 且有^[4]

$$\gamma_i = (2\pi\Delta/\lambda) \sin \theta_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

2.4 基于高阶累积量的 HC-MUSIC 算法

输出信号 $X(k)$ 的四阶矩矩阵 M_x 和四阶累积量矩阵 C_x 均为 $M^2 \times M^2$ 方阵, 其形式可用矩阵的 Kronecker 积表示为

$$M_x = E[(X \otimes X^*)(X \otimes X^*)^H] \quad (6)$$

$$C_x = M_x - E[X \otimes X^*]E[(X \otimes X^*)^H] - E[XX^H] \otimes E[(XX^H)^*] \quad (7)$$

对 C_x 进行特征分解。通常信号的相关性是未知的, 保守的方法是假定信号相关, 并取信号子空间由 N^2 个最大特征值对应的特征向量生成, 则噪声子空间 E_{CN} 由 $M^2 - N^2$ 个特征向量生成, 这样便可得到基于四阶累积量的 MUSIC 算法的扫描谱^[5]

$$P_{\text{HC-MUSIC}}(\theta) = 1 / \left\| E_{CN}^H [a(\theta) \otimes a^*(\theta)] \right\|^2 \quad (8)$$

3 实验结果

用上述超分辨算法对实验系统所录存的数据进行处理, 得到表 1 给出的实验结果, 其中目标距离和方位角由米波雷达现场观察提供, 信噪比通过实测数据计算得到。从实验结果可以看出, 对本文给出的几种超分辨算法, 仅有 FBLP 和 ESPRIT 算法能分辨出两架飞机, 而其他算法不能正确分辨, 此时阵天线的和波束宽度约为 8° 。

表 1 超分辨实验结果

算法名称	FBLP	MUSIC	MNM	ESPRIT	HC-MUSIC
实验 1: 两架飞机, 位于 180 km 处, 方位角 115° , 快拍数 $k=64$, 信噪比 $SNR=5.85$ dB	$\hat{\theta}_1 = -0.93^\circ$ $\hat{\theta}_2 = 1.58^\circ$	不能 分辨	不能 分辨	$\hat{\theta}_1 = -0.930^\circ$ $\hat{\theta}_2 = 0.920^\circ$	不能 分辨
实验 2: 两架飞机, 位于 175 km 处, 方位角 120° , 快拍数 $k=64$, 信噪比 $SNR=8.12$ dB	$\hat{\theta}_1 = -1.05^\circ$ $\hat{\theta}_2 = 1.75^\circ$	不能 分辨	不能 分辨	$\hat{\theta}_1 = -0.473^\circ$ $\hat{\theta}_2 = 0.980^\circ$	不能 分辨
实验 3: 两架飞机, 位于 165 km 处, 方位角 127° , 快拍数 $k=64$, 信噪比 $SNR=9.86$ dB	$\hat{\theta}_1 = -1.20^\circ$ $\hat{\theta}_2 = 1.60^\circ$	不能 分辨	不能 分辨	$\hat{\theta}_1 = -0.700^\circ$ $\hat{\theta}_2 = 0.803^\circ$	不能 分辨

4 讨论

本文给出的米波雷达方位角超分辨外场实验能真实地反应雷达实际工作环境各种非理想因素的影响。虽然实验并不充分, 但也能得到一些有益的结果。理论分析认为, 基于特征分解的 MUSIC 等算法具有比 FBLP 法更优良的 DOA 估计性能, 但本实验结果并非如此, 这是一个有待进一步分析的问题, 可能是实际工作环境的诸如快拍次数有限等非理想因素使 MUSIC 算法的性能变差, 以致于不能正确地分辨出两目标^[9]。基于高阶累积量特征分解的 HC-MUSIC 算法也存在相似的情况。另外, 同样的实验数据, FBLP 算法处理的结果, 两架飞机的角间隔约为 $2.5^\circ \sim 3^\circ$, 即大约 0.3 波束宽度。而采用 ESPRIT 算法, 两架飞机间的角间隔约为 1.5° , 即大约 0.2° 波束宽度, 由于没有目标角位置的先验知识, 无法判断哪一个更准确。

感谢南京电子技术研究所提供的实验条件。

参 考 文 献

- 1 Haykin S. Adaptive filter theory. New Jersey: Prentice-Hall, 1986
- 2 Schmidt R O. A signal subspace approach to multiple emitter location and spectral estimation: [Ph. D Dissertation]. Stanford: Stanford University, 1981
- 3 Kumaresan R, Tufts D. Estimating the angles of arrival of multiple plane waves. IEEE Trans Aerospace Electron Syst, 1990, AES-19: 1 842~1 852
- 4 Roy R, Kailath T. ESPRIT-Estimation of signal parameter via rotational invariance techniques. IEEE Trans SP, 1989, 37: 984~995

- 5 Porat B, Friedlander B. Direction finding algorithm based on high-order statistics. IEEE Trans SP, Set. 1991, 39: 2 016~2 023
- 6 魏平, 肖先赐. 高分辨阵列测向系统中的基本算法性能实验. 电子科技大学学报, 1997, 26(增刊): 108~113
- 7 何子述, 黄振兴, 庞晓凤. 用多旁瓣对消 MSLC 系统实现角度超分辨. 电子科技大学学报, 1997, 26(增刊): 101~107
- 8 Haykin S, Keily J P. Some aspects of array signal processing. IEEE Proc, 1992, 139: 1~25
- 9 何子述, 黄振兴, 向敬成. 基于数据阵共轭重构的 MUSIC 角估计算法. 电子科技大学学报, 1999, 28, (2): 111~115

Research on Field Experiment of Azimuth Super-resolution for Meter Band Radar

He Zishu Huang Zhenxing Xiang Jingcheng

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

Abstract This paper gives a field experimental system consisting of an uniform four-element linear array and a meter band radar, which is designed for azimuth super-resolution test of meter band radar. The sampled experimental data are processed with different algorithms. It is indicated that two airplanes being 0.2~0.3 beam width apart in azimuth can be resolved clearly by FBLP algorithm and ESPRIT algorithm.

Key words meter band radar; super-resolution; field test; signal DOA estimation

· 科研成果介绍 ·

接力通信抗干扰技术

主研人员: 李仲令 龚跃寰 吕明 葛造坤 张洋 王晓蕾等

接力通信抗干扰技术包括码分多路调制/解调和自适应干扰抑制两部分。码分多路调制技术利用码分复用将高速数字信号分解成多个低速信号, 完成扩频、调制和多路复用, 收端用多路解扩、解调, 以解决接力通信中信息高速率与主抗干扰性间的矛盾。自适应干扰抑制则是用横向滤波方法抑制信号带宽内的强干扰, 增强接力通信系统的抗干扰能力。

该成果可应用于新的接力通信系统和其他点对点、点对多点高速信息抗干扰传输系统, 可为传输高速信息提供可靠的抗干扰技术, 解决宽带信息抗干扰传输的难题。

· 科 卜 ·