

doi: 10.3969/j.issn.1003-3106.2023.12.005

引用格式: 崔宏, 马杰. 不同阵列布局的空间谱测向方法的抗多径性能研究[J]. 无线电工程, 2023, 53(12): 2765-2770. [CUI Hong, MA Jie. Study on Anti-multipath Performance of Spatial Spectrum Based Direction-finding Technique with Different Array Pattern [J]. Radio Engineering, 2023, 53(12): 2765-2770.]

不同阵列布局的空间谱测向方法的抗多径性能研究

崔宏, 马杰

(青岛市无线电监测站, 山东 青岛 266075)

摘要: 城市复杂传播环境导致的多径衰落问题对于无线电辐射源的定位效果有着显著的影响。基于空间谱的测向体制有着对不同波达方向同频信号的测向和多径分离能力。从理论上推导任意阵列流型空间谱估计算法对信号多径效应的适用性, 并重点针对圆阵和随机阵列布局, 通过仿真验证了多径传播下的性能, 定量评估了不同时延和径数对多径测向的影响。为在实际复杂场景下进行高效、可靠的测向工作做出了有益的探索。

关键词: 多径传播; 阵列布局; 空间谱测向技术

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1003-3106(2023)12-2765-06

Study on Anti-multipath Performance of Spatial Spectrum Based Direction-finding Technique with Different Array Pattern

CUI Hong, MA Jie

(Radio Monitoring Station of Qingdao, Qingdao 266075, China)

Abstract: Multipath-fading effect under complex urban environment will evidently impact the performance of radio source location. The spatial spectrum-based direction-finding technique is capable of estimating the bearing of co-frequency signals with different angle of arrival, also capable of separating them. First, the applicability of the spatial spectrum estimation algorithm of any array pattern on the multipath effect is derived theoretically, then the performance of spatial spectrum-based technique with circular and arbitrary array patterns are demonstrated under multipath propagation by simulation. Also, the influence on multipath direction finding of different time delays and number of paths are further quantificationally evaluated. The aforementioned study will help to improve the reliability and efficiency of direction-finding under complex scenarios.

Keywords: multipath propagation; array pattern; spatial spectrum-based technique

0 引言

在城市复杂环境中, 无线电波的传输具有时、频、空域的复杂性, 反射、绕射等现象会引起显著的多径传播效应, 导致在监测接收端会收到从不同方向入射的同一信号的多径分量, 此时会对测向系统造成严重的影响, 产生偏差较大乃至错误的结果^[1]。空间谱测向系统具有一定的同频信号和信号的多径分量分离能力, 是应对该问题的一类有效方法^[1], 在多个领域得到了成功的应用, 成为近二十年无线电测向技术的研究热点^[2]。Belloni等^[3]给出了空间谱估计的理论框架。文献[4]给出了典型空间谱估计算法的性能比较, 并对其工程实现的相关考虑进行了研究^[5-6]。文献[7-9]给出了

在复杂无线电监测场景下应用空间谱测向算法的思考, 指出了当前的局限性和发展趋势。

针对同频多信源和多径2类复杂场景, 文献[10]和文献[11-12]分别研究了空间谱算法的适用性, 文献[13]进一步研究了存在强干扰和多径这一复杂电磁环境下, 对应的改进 MUSIC 测向算法。同时, 在如何优化 MUSIC 阵列, 提高其性能和估计能力方面, 也有文献做出了深入的探索。其中文献[14]提出了基于矩阵重构技术的新型 MUSIC 算法, 使其具备波达方向和扩展角同时估计的能力; 文

收稿日期: 2023-07-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(62031012)

Foundation Item: Key Program of National Natural Science Foundation of China(62031012)

献[15]提出了一种新型的互质阵列,在同样阵元数下,能够实现更大的阵列孔径、更高的测向精度、更高的自由度以及更高的分辨率;文献[16]针对非均匀圆阵这一较为特殊的阵列,研究了相应测向算法的性能;文献[17]则另辟蹊径,提出了利用粒子滤波进行测向算法的抗多径,取得了一定的效果。

根据上述分析,有必要进一步考虑任意阵列流型这一最具普适性的阵列结构,深入研究存在多径,特别是时延较小的强相干多径模式下,MUSIC算法的抗多径性能。可通过理论与仿真相结合的方式,针对典型测向阵列流型,对不同时延、不同径数下的性能进行深入评估,从而为实际场景下有效区分多径信号提供必要的理论依据。

本文第一节首先对现有传统阵列结构进行拓展,首次给出了任意阵列这一更具一般性的阵列布局下,对应的空间谱测向算法。第二节重点针对圆型阵列布局,通过仿真来深入地定量评估不同多径时延和径数下的测向性能,特别是对时延小于一个符号周期的多径分量强相干的情况,率先进行了深入研究;同时也进一步探索了随机阵列对于多径信号区分的可行性。最后进行了小结。

1 多径传播环境下任意阵列流型的信号测向算法设计

1.1 多径模式下阵列模型

考虑三维空间模型,假设阵元有 M 个,考虑把第一个阵列对应的位置作为坐标零点,可以记为 $\mathbf{q}_1 = [0 \ 0 \ 0]^T$,依次可以把其他的阵元位置标记为 $\mathbf{q}_j = [x_j \ y_j \ z_j]^T (j=2 \ 3 \ \cdots \ M)$ 。另外,考虑入射的径数为 $P (P \geq 1)$,第 i 个点相对坐标零点的方位角和俯仰角向量记为 $[\varphi_i \ \theta_i] (i=1 \ 2 \ \cdots \ N)$ 。考虑水平方向构成 XOY 平面,高度为 Z 平面,定义俯仰角 φ_i 为入射电波与 XOY 平面的夹角,方位角 θ_i 为入射电波与 Y 轴的夹角。基于此模型,对应的三维方位矢量可以表示为 $\mathbf{u}_i = [\cos \varphi_i \sin \theta_i, \cos \varphi_i \cos \theta_i, \sin \varphi_i]$ 。此时若考虑第 j 个阵元接收到的信号,则 $x_j(t)$ 可以表示为^[18]:

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^N \exp(-2\pi f_i \tau_{ij}) s_i(t) + n_j(t), \quad (1)$$

式中: f_i 为第 i 个信源的中心频率, $s_i(t)$ 为第 i 个入射信源, $n_j(t)$ 为第 j 个接收阵元的噪声,一般为加性高斯白噪声; τ_{ij} 为第 i 个信源和第 j 个接收阵元相对于坐标零点的时延。

$$\tau_{ij} = -\frac{\mathbf{u}_i \mathbf{q}_j^T}{c} = -\frac{1}{c} (x_j \sin \theta_i \cos \varphi_i + y_j \cos \theta_i \cos \varphi_i + z_j \sin \varphi_i), \quad (2)$$

式中: c 为光速。根据上述分析,可以定义第 i 个信源的阵列流型向量 $\mathbf{a}(\theta_i \ \varphi_i)$ 和阵列流型矩阵 \mathbf{A} 分别为:

$$\mathbf{a}(\theta_i \ \varphi_i) = [a_1(\theta_i \ \varphi_i) \ a_2(\theta_i \ \varphi_i) \ \cdots \ a_M(\theta_i \ \varphi_i)]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1 \ \varphi_1) \ \mathbf{a}(\theta_2 \ \varphi_2) \ \cdots \ \mathbf{a}(\theta_N \ \varphi_N)] \quad (4)$$

根据上述模型,信号向量和噪声向量可以分别表示为 $\mathbf{S}(t)$ 和 $\mathbf{N}(t)$,故可以定义接收信号向量 $\mathbf{X}(t)$ 为:

$$\mathbf{S}(t) = [s_1(t) \ s_2(t) \ \cdots \ s_N(t)]^T, \quad (5)$$

$$\mathbf{N}(t) = [n_1(t) \ n_2(t) \ \cdots \ n_M(t)]^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \cdots \ x_M(t)]^T. \quad (7)$$

因此,在多径环境下,空间多阵元的阵列模型可以写为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t). \quad (8)$$

上述模型即为在多径传播环境下,多阵元的接收阵列模型,可以通过该式设计相应的波达方向估计算法。

1.2 基于 MUSIC 算法的多阵元多径信号来波方向估计

本节基于式(8)的模型,推导对应的 MUSIC^[4]算法,给出多径传播条件下多阵元模型的估计步骤:

步骤①:假设连续进行了 P 次采样,每一时刻各个阵元得到的接收信号向量为 $\mathbf{X}(t)$,那么可以估计得到其协方差矩阵 \mathbf{R} 如下:

$$\mathbf{R} = \frac{1}{P} \sum_{t=1}^P \mathbf{X}(t) \mathbf{X}^H(t). \quad (9)$$

步骤②:采用奇异值分解的方法,对矩阵 \mathbf{R} 进行分解,得到对应的特征值和特征向量,并降序进行组合排列。

步骤③:对于 M 个特征值,采用信息论准则 (MDL)^[18]进行理论上多径数 N 的估计。理想情况下,应该只有按照降序排列的前 N 个特征值为非零值,剩余的 $M-N$ 个特征值应均为零。考虑到样本个数有限,最小的 $M-N$ 个特征值接近零但不相等,并与前 N 个特征值差距较大,可根据 MDL 进行判定确定 N 。

步骤④:得到 N 的估计值后,构造其他 $M-N$ 个特征值对应的特征向量矩阵 $\mathbf{E}_N = [\mathbf{V}_{M-N+1} \ \cdots \ \mathbf{V}_M]$ 。

步骤⑤:根据式(3)定义的方位向量 $\mathbf{a}(\theta \ \varphi)$,以及步骤④得到的噪声子空间矩阵 \mathbf{E}_N ,构建以 θ 、 φ 为变量的二维方位俯仰估计的 MUSIC 谱函数如下:

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta, \varphi) = \frac{1}{\alpha^H(\theta, \varphi) E_N E_N^H \alpha(\theta, \varphi)} \quad (10)$$

步骤⑥: 基于式(10), 在 θ 和 φ 得到的二维平面上进行搜索, 依次得到幅度最大的 N 个谱峰的位置, 进一步对应查找得到方位和俯仰值, 即为各个发射源来波方向和俯仰的估计值。

2 仿真评估

首先在 2.1 节验证 1.2 节理论推导的正确性, 然后在 2.2 节针对最常用的圆型阵列, 定量仿真评估其在不同径数和时延下抗多径测向的能力。

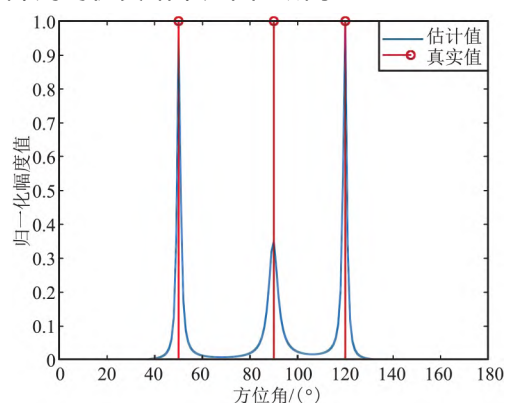
2.1 随机阵仿真结果

2.1.1 仿真参数设置

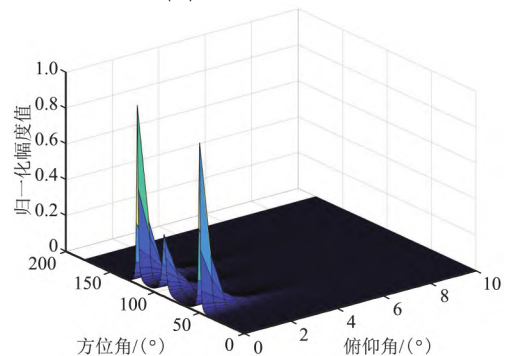
信号频率为 100 MHz, 采用随机阵进行仿真, 符号数为 1 000, 过采样倍数为 10, 带内信噪比为 10 dB。考虑 3 径的情况, 设定多径入射角分别为 50° 、 90° 、 120° , 俯仰角均为 0° 。考虑不同时延和幅度的影响。

2.1.2 仿真结果

(1) 随机阵列分布在 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 的平面上, 3 径延时为 0、1、2 个符号周期。1.5 m \times 1.5 m 范围内随机阵列的仿真结果如图 1 所示。



(a) 方位估计截面图

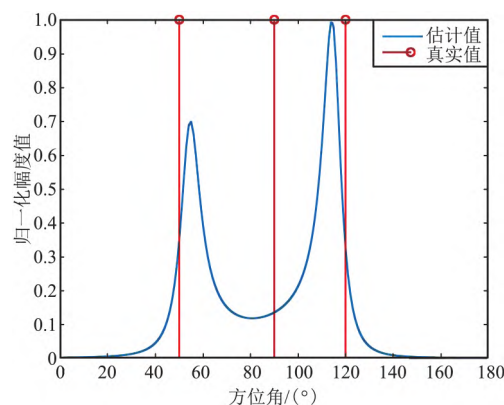


(b) 方位/俯仰三维估计图

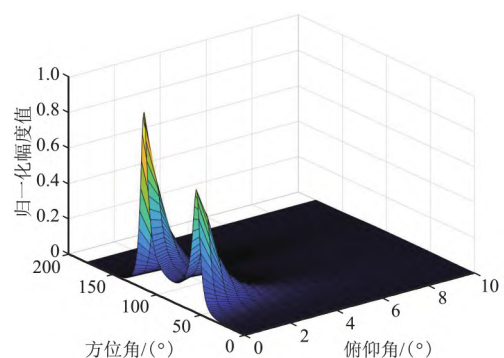
图 1 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 范围内随机阵列的仿真结果

Fig.1 Simulation result of randomized array in the range of $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$

(2) 分布在 $0.75 \text{ m} \times 0.75 \text{ m}$ 的平面上, 3 径延时为 0、1、2 个符号周期。 $0.75 \text{ m} \times 0.75 \text{ m}$ 范围内随机阵列的仿真结果如图 2 所示。



(a) 方位估计截面图



(b) 方位/俯仰三维估计图

图 2 $0.75 \text{ m} \times 0.75 \text{ m}$ 范围内随机阵列的仿真结果

Fig.2 Simulation result of randomized array in the range of $0.75 \text{ m} \times 0.75 \text{ m}$

从图 1 和图 2 可以看出, 存在多径延时, 基于 MUSIC 的空间谱算法也适用, 验证了 1.2 节推导的正确性。但是, 当基线尺度小于 0.5 倍波长时, 会出现估计错误的情况。基线的大小对于估计的性能有着显著的影响。

2.2 圆形阵列性能的定量评估

2.2.1 3 径情况

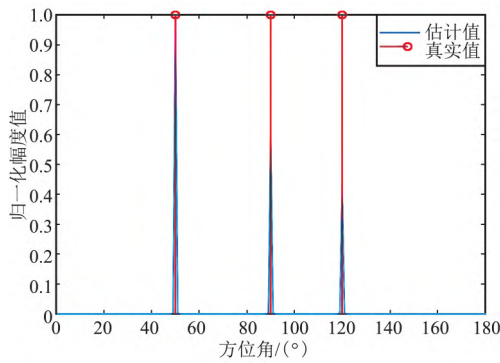
2.2.1.1 仿真参数设置

信号频率为 100 MHz, 采用圆阵进行仿真, 圆阵直径为 1 m, 接收信号的符号数为 1 000, 过采样倍数为 10 (即每个符号内的采样点数), 带内信噪比为 10 dB。设定多径入射角分别为 50° 、 90° 、 120° , 俯仰角均为 0° , 3 径的相对幅度设置为 1、0.9、0.9, 考虑不同时延的影响。

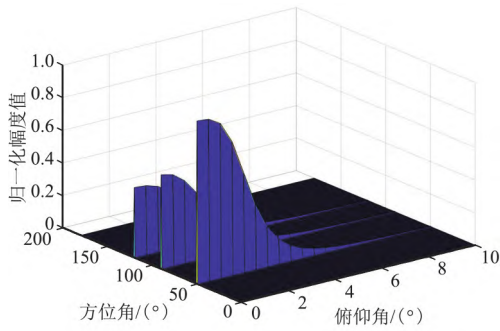
2.2.1.2 仿真结果

① 3 径延时为 0、1、2 个符号周期

3 径延时为 0、1、2 个符号周期时仿真结果如图 3 所示。



(a) 方位估计截面图



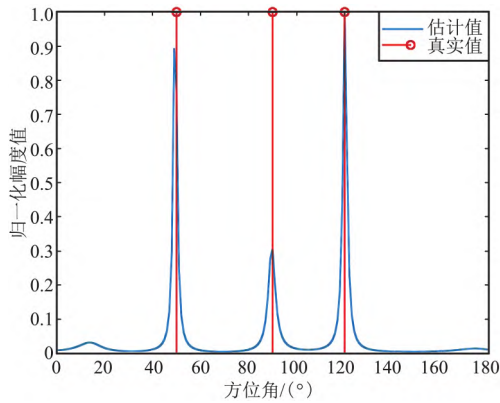
(b) 方位/俯仰三维估计图

图 3 3 径延时为 0、1、2 个符号周期时仿真结果

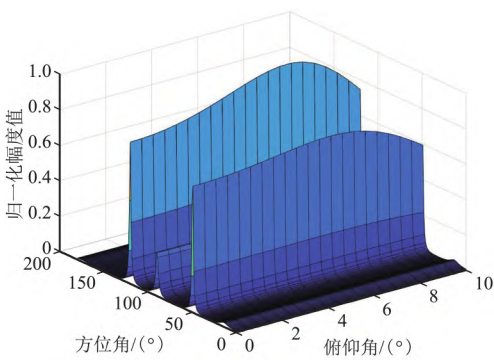
Fig.3 Simulation results of three time delays of 0, 1, 2 symbol intervals

② 3 径延时为 0、0.4、0.8 个符号周期

3 径延时为 0、0.4、0.8 个符号周期时仿真结果如图 4 所示。



(a) 方位估计截面图



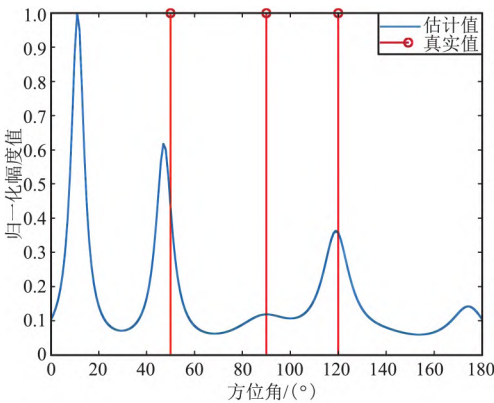
(b) 方位/俯仰三维估计图

图 4 3 径延时为 0、0.4、0.8 个符号周期时仿真结果

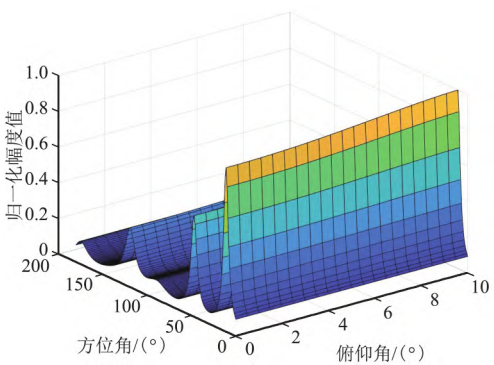
Fig.4 Simulation results of three time delays of 0, 0.4, 0.8 symbol intervals

③ 3 径延时为 0、0.3、0.6 个符号周期

3 径延时为 0、0.3、0.6 个符号周期时仿真结果如图 5 所示。



(a) 方位估计截面图



(b) 方位/俯仰三维估计图

图 5 3 径延时为 0、0.3、0.6 个符号周期时仿真结果

Fig.5 Simulation results of three time delays of 0, 0.3, 0.6 symbol intervals

从上面的仿真结果可以看出,第一组仿真的时延分别为 0、1、2 个符号周期时,主径和另外 2 个多径的波达方向估计基本正确,俯仰值的估计也符合设定值;第二组的仿真时延进一步缩小到 0、0.4、0.8 个符号周期时,方位和俯仰的估计值基本正确;但

是,当第三组的仿真时延进一步缩小到 0、0.3、0.6 个符号周期时,对应仿真时延为 0.3 的波达方向估计错误,且影响了时延为 0 时 50° 波达方向的估计误差,估计结果可靠性显著降低。因此,可以得出初步结论,在 3 径的情况下且信噪比较好时,若多径时延大于 0.3~0.4 个符号周期,且角度区分度较大时,多径的波达方向是可分的,此时估计结果的准确性和可靠性较高。

2.2.2 4 径情况

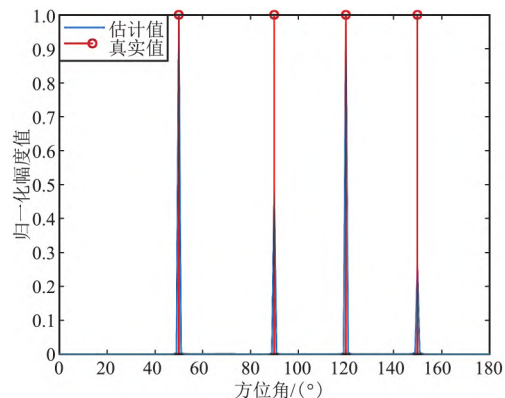
2.2.2.1 仿真参数设置

信号频率为 100 MHz,采用圆阵进行仿真,圆阵直径为 1 m,接收信号的符号数为 1 000,过采样倍数为 10(即每个符号内的采样点数),带内信噪比为 10 dB。设定多径入射角分别为 50° 、 90° 、 120° 、 150° ,俯仰角均为 0° ,4 径的相对幅度设置为 1、0.9、0.9、0.9,考虑不同时延的影响。

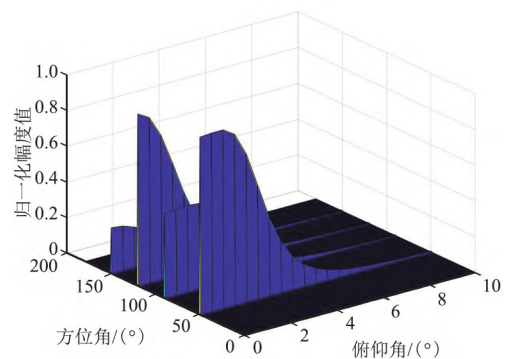
2.2.2.2 仿真结果

① 4 径延时为 0、1、2、3 个符号周期

4 径延时为 0、1、2、3 个符号周期时仿真结果如图 6 所示。



(a) 方位估计截面图



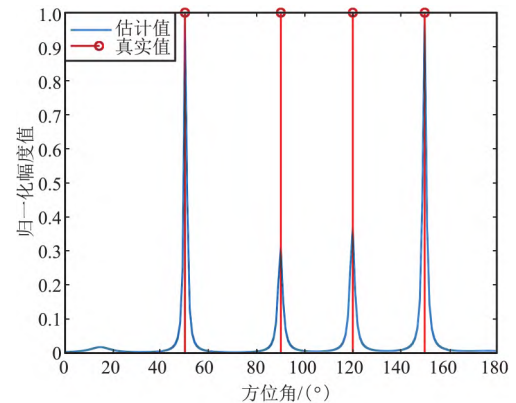
(b) 方位/俯仰三维估计图

图 6 4 径延时为 0、1、2、3 个符号周期时仿真结果

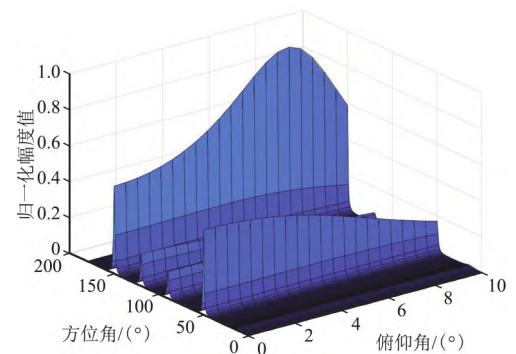
Fig.6 Simulation results of four time delays of 0, 1, 2, 3 symbol intervals

② 4 径延时为 0、0.5、1.0、1.5 个符号周期

4 径延时为 0、0.5、1.0、1.5 个符号周期时仿真结果如图 7 所示。



(a) 方位估计截面图



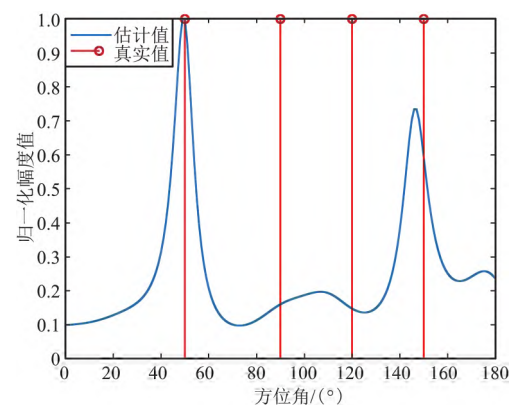
(b) 方位/俯仰三维估计图

图 7 4 径延时为 0、0.5、1.0、1.5 个符号周期时仿真结果

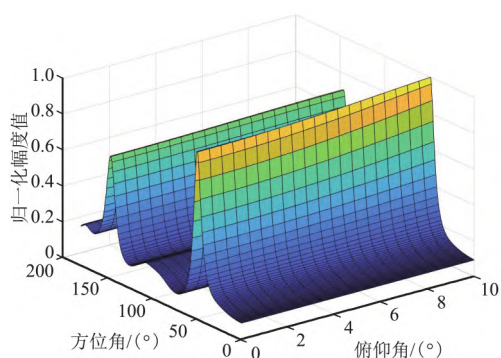
Fig.7 Simulation results of four time delays of 0, 0.5, 1.0, 1.5 symbol interval

③ 4 径延时为 0、0.4、0.8、1.2 个符号周期

4 径延时为 0、0.4、0.8、1.2 个符号周期时仿真结果如图 8 所示。



(a) 方位估计截面图



(b) 方位/俯仰三维估计图

图8 4径延时为0.0.4.0.8.1.2个符号周期时仿真结果
Fig.8 Simulation results of four time delays of 0 0.4 0.8 , 1.2 symbol intervals

从上面的仿真结果可以看出,与2.2.1节的情况基本相似。第一组仿真的时延分别为0、1、2、3个符号周期时,主径和另外3个多径的波达方向估计基本正确,俯仰值的估计也符合设定值;第二组的仿真时延进一步缩小到0.0.5.1.0.1.5个符号周期时,方位和俯仰的估计值基本正确;但是,当第三组的仿真时延进一步缩小到0.0.4.0.8.1.2个符号周期时,对应仿真时延为0.4.0.8个符号周期的波达方向估计错误,且影响了时延为1.2个符号周期对应的150°波达方向的估计误差,估计结果可靠性显著降低。因此,可以得出初步结论,在4径情况下信噪比较好时,若多径时延大于0.4~0.5个符号周期,且角度区分度较大时,多径的波达方向是可分的,估计结果的准确性和可靠性较高。同时,对比2.2.1节的结论可以看出,随着多径数的增加,在同样时延下的估计效果也会变差。

基于上述仿真结果,可以考虑针对性设计实现智能化的多径测向结果剔除策略,通过采用深度学习网络等AI技术,对不同径数、不同时延下多径的峰值进行仿真分析,得到主径峰值的出现规律知识库,从而实现主径的自动判断,提升系统的自动化水平。

3 结束语

本文研究了典型测向阵列抗多径的性能。首先通过理论推导和仿真验证了多径信号的测向可分离性,其次重点针对最为典型的圆型测向阵列,通过仿真定量研究了不同多径数和不同时延下的多径信号分离测向性能。可以看出,多径数越多,进行分离测向的难度越大,同时,在非主径的时延减小时,分离效果显著降低。本文的研究可以为存在多径传播的

复杂场景下的多径信号的分离和直射径的准确测向提供一定的借鉴。



参考文献

- [1] 周鸿顺. 频谱监测手册 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [2] 朱庆厚. 无线电监测与通信侦察 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [3] BELLONI F, RICHER A, KOIVUNEN V. DoA Estimation via Manifold Separation for Arbitrary Array Structures [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(10): 4800-4810.
- [4] 朱肃嫻. 几种空间谱估计测向算法的比较 [J]. 通信电源技术, 2018, 35(8): 206-209.
- [5] 张智锋, 王艳温, 母诗源. 空间谱测向算法的实数域定点实现技术 [J]. 数字技术与应用, 2021, 39(5): 94-96.
- [6] 李鑫. 基于空间谱估计的测向系统研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [7] 段洪涛, 吕冰. 空间谱测向算法综述 [J]. 中国无线电, 2021(12): 31-32.
- [8] 田剑豪. 三种典型空间谱测向算法的分析比较 [J]. 中国无线电, 2021(2): 81-83.
- [9] 肖鑫, 彭忠宝, 周平. 空间谱测向技术及其经典算法 [J]. 中国无线电, 2019(4): 63-66.
- [10] 胡荣飞, 林自豪. 均匀圆阵空间谱估计对多目标信号分离方法的研究 [J]. 中国无线电, 2018(7): 48-49.
- [11] 沙晶晶, 施游立. 基于空间谱估计的多目标信号分离研究 [J]. 现代电子技术, 2010, 33(23): 85-87.
- [12] 曹钰静. 基于相干信源背景的均匀圆阵空间谱估计算法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [13] 姚昕彤. 复杂电磁环境下的空间谱测向算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [14] 王宇. 基于阵列重构的空间谱高分辨测向技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [15] 弓盼. 互质阵中的阵列结构设计和空间谱估计算法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [16] 卢海杰, 章新华, 熊鑫. 流形分离在非均匀圆阵上的应用 [J]. 兵工学报, 2011, 32(9): 1113-1117.
- [17] 汪立新, 林孝焰, 吴涛. 基于粒子滤波技术的抗多径测向方法 [J]. 电路与系统学报, 2007, 13(3): 11-14.
- [18] 张贤达. 信号处理中的线性代数 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.

作者简介

崔宏男 (1971—), 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 无线电监测与测向。

马杰男 (1980—), 高级工程师。主要研究方向: 新型无线电测向。