

中文核心期刊要目总览

- 中国科技核心期刊
- 中国科学引文数据库 (CSCD)
- 中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)
- •中国学术期刊文摘数据库 (CSAD)
- 中国学术期刊(网络版) (CNKI)

• 中文科技期刊数据库

• 万方数据知识服务平台

- 中国超星期刊域出版平台
- 国家科技学术期刊开放平台
- 荷兰文摘与引文数据库(SCOPUS)
 日本科学技术振兴机构数据库(JST)

非均匀地面参数对短波阵列测向的影响

任晓飞,李 虎,朱金鹏,王敏男,何绍林,宋晓远

Influence of inhomogeneous ground parameters on HF direction finding

REN Xiaofei, LI Hu, ZHU Jinpeng, WANG Minnan, HE Shaolin, and SONG Xiaoyuan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023056

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于谐波特征分析的时间调制阵列测向研究进展

Progress in direction finding based on time modulated array with harmonic characteristic analysis 电波科学学报. 2021, 36(2): 163–171

基于压缩感知的相关干涉仪测向算法

Direction finding algorithm for correlative interferometry in the framework of compressive sensing 电波科学学报. 2018, 33(5): 532-536

基于幅相误差阵列的远近场混合信号超分辨测向方法

Super-resolution direction finding method for mixed far-field and near-field signals based on gain-phase error array 电波科学学报. 2017, 32(2): 227-236

短波时差定位中电离层参数对定位影响仿真

Simulation on the effect of ionospheric parameters on TDOA location in short wave 电波科学学报. 2017, 32(4): 462–466

基于双旋转单偶极子阵列的谱参数估计方法

Spectral parameter estimation method based on double rotation single dipole array 电波科学学报. 2018, 33(1): 77-84

近地面1 km高度处折射率梯度与地面气象参数统计关系的研究

The statistical relationship between refractivity gradient in the lowest 1 km near the ground and ground meteorological parameters 电波科学学报. 2020, 35(6): 896–901



关注微信公众号,获得更多资讯信息

任晓飞,李虎,朱金鹏,等. 非均匀地面参数对短波阵列测向的影响[J]. 电波科学学报, 2023, 38(4): 714-720. DOI: 10.12265/j.cjors.2023056 REN X F, LI H, ZHU J P, et al. Influence of inhomogeneous ground parameters on HF direction finding[J]. Chinese journal of radio science, 2023, 38(4): 714-720. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023056

非均匀地面参数对短波阵列测向的影响

任晓飞* 李虎 朱金鹏 王敏男 何绍林 宋晓远 (中国电波传播研究所,青岛 266107)

摘 要 针对非均匀地面参数引起的短波测向误差问题,导出了含有地面参数的测向阵列流形模型,给出 了水平极化和垂直极化两种圆形阵列流形的具体表达式,并利用多重信号分类 (multiple signal classification, MUSIC) 方法对地面参数不均匀性导致的两种阵列测向误差进行了仿真. 仿真结果表明: 对沿着地面参数不均匀 区分界方向的来波信号,方位角测向明显存在较大的测向误差; 在低电导率的非均匀地面,地面相对介电常数的 变化对方位角测向误差有着显著影响,可达到 2°~3°; 非均匀地面参数对垂直极化阵列测向误差要比水平极化 阵列高出 1°~2°. 因此在短波固定测向站建设时,尽可能选址高电导率区域,并铺设地网改善天线场地的均匀 性,来消除非均匀地面参数变化引起的测向误差.

关键词 非均匀;短波阵列;测向;地面参数;多重信号分类 (MUSIC)

中图分类号 TN828 文献标志码 A 文章编号 1005-0388(2023)04-0714-07 DOI 10.12265/j.cjors.2023056

Influence of inhomogeneous ground parameters on HF direction finding

REN Xiaofei^{*} LI Hu ZHU Jinpeng WANG Minnan HE Shaolin SONG Xiaoyuan (*China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao* 266107, *China*)

Abstract The array manifold with ground parameters is derived for the HF direction finding (DF) error caused by the inhomogeneous ground parameters. Two kinds of circular array manifolds concluded of horizontal polarization and vertical polarization are given. The DF error is simulated with the MUSIC method for the two kinds of DF array. Simulation results show that there is obvious DF error of azimuth angle in the non-uniform boundary zone; on nonuniform ground with low conductivity, there is a significant DF error with the change in relative dielectric constant of the ground, which can reach $2^{\circ}-3^{\circ}$; the DF error of vertical polarization array is about $1^{\circ}-2^{\circ}$ greater than the error of horizontal array. During construction of HF direction finding station, it is necessary to select areas with high conductivity, and lay a metal grid on the ground to eliminate DF errors caused by changes in ground parameters.

Keywords inhomogeneous; HF array; direction finding; ground parameter; multiple signal classification (MUSIC)

0 引 言

短波测向在无线电监测系统中发挥着重要的作用.现有短波固定测向站大都采用多通道阵列测向 方法,利用天线阵列的幅度和相位进行来波方向的 估计,如沃森瓦特、乌兰韦伯、相关干涉仪、空间谱 等测向方法^[1-3].测向天线是整个测向系统射频前端 最重要的环节之一,测向系统对天线本身电性能和 物理安装的一致性都有明确要求,以保证接收短波 信号的波前一致,提高系统测向精度^[4-5].

由于短波测向系统主要对天波信号进行来波方 向估计,除了与测向天线本身特性紧密相关外,还与 电离层、实际地面紧耦合,其性能受周围环境影响很 大,包含电离层状态和周边站址环境,一般要求测向

天线周边环境保持良好的一致性.测向站的建设对 周边高压线、建筑物、河流等可能引起环境不一致 的障碍物的距离都有明确要求[6]. 文献 [7] 从电离层 传播介质、短波测向设备和其架设场地的角度讨论 了产生短波测向误差的来源与误差估算. 文献 [8] 利 用垂直放置的阵列与算法估计提高了小型短波测向 阵测向的精度. 文献 [9] 从电离层传播介质角度讨论 了电离层系统倾斜对测向系统带来的影响. 文献 [10] 分析了非均匀地面对天线的性能影响. 但众多短 波测向研究大都以测向算法性能提升效果为目的, 鲜有将地面参数的非均匀性引入到测向模型中系统 性地进行测向误差定量分析.然而实际短波测向站 选址和建设时,需要对测向场地进行综合评估论证, 如当短波测向场地受实际条件限制,存在地面导电 参数不均匀情形时,对测向系统的测向精度产生多 少影响?这些都是系统建设论证的重要内容之一.本 文研究正是基于此背景,通过建立短波测向场地参 数模型,进行测向误差定量分析,为短波测向场地建 设和选址提供理论指导.

本文从电偶极子基本辐射场出发,首先利用直 达波和地面反射波叠加原理,引入地面条件参数,推 导出了存在地面参数情况下的水平极化和垂直极化 两种测向阵列的通用阵列流形表达式(阵列导向矢 量);其次对短波测向台站地面导电参数非均匀性进 行了建模,且在同一测向站中构建了两种不同的地 面导电参数;最后应用空间谱测向算法——多重信 号分类(multiple signal classification, MUSIC)方法,仿 真分析了非均匀地面电参数对短波测向精度的影响 及变化.文中研究有利地支撑了短波测向台站选址 和建设评估论证,对短波测向台站的建设具有理论 和实际指导意义.虽然文中采用电偶极子天线作为 测向天线进行含地面参数的阵列流形推导,但是同 样适用于一般偶极子天线或其他复杂天线的阵列流形.

1 含地面参数的天线阵列流形

1.1 水平极化圆形测向阵列

实际地面上水平电偶极子激起的场由直达波、 地面反射波以及表面波构成.若只考虑上半空间的 辐射场时,表面波在辐射远区可以忽略^[11].因此实际 的上半空间辐射场可近似认为由直达波与反射波构 成,故远区反射场可由平面波反射理论确定(几何光 学法).

根据平面波理论,其远区辐射场为直达波场与 反射场的叠加,因此总的辐射振幅为

$$\boldsymbol{a}(\boldsymbol{k}) = \boldsymbol{a}_{\mathrm{d}}(\boldsymbol{k}) + \boldsymbol{a}_{\mathrm{r}}(\boldsymbol{k}) \tag{1}$$

式中: *a*_a为自由空间中辐射振幅, 即直达波的辐射振幅; *a*_r为经过地面反射后的反射波辐射振幅. 自由空间中任意电流源空间辐射振幅矢量^[12]

$$\boldsymbol{a}_{\rm d}(\boldsymbol{k}) = \frac{k}{4\pi\,\mathrm{j}} \int_{\boldsymbol{v}} [\sqrt{Z}(\bar{\boldsymbol{l}} - \hat{\boldsymbol{r}}\hat{\boldsymbol{r}}) \cdot \boldsymbol{J}(\boldsymbol{r}')] \mathrm{e}^{\mathrm{j}\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}'} \mathrm{d}\boldsymbol{v} \qquad (2)$$

设水平电偶极子处于 xOy 面内, 电偶极子方向 **î**与 x 轴的方向夹角为α, 方向定义 x 轴方向逆时针为 正, 距离地面高度为 H, 电偶极子到坐标系原点的水 平投影距离为R₀, 建立坐标系如图 1 所示.





Fig. 1 Coordinate system of the electric dipole with horizontal polarization

将电偶极子的电流分布 $J(\mathbf{r}') = IL\hat{l}^{[11]}$ 带入式 (2), 并考虑到 $\hat{l} = e_x \cos \alpha + e_y \sin \alpha$, 经过较为复杂的推导, 在不考虑互耦效应下, 电偶极子直达波的辐射振幅 为 (忽略幅度常数系数 $kIL\sqrt{Z}/(4\pi j)$)

 $\boldsymbol{a}_{d} = [\cos \vartheta \cos(\alpha - \varphi)\boldsymbol{e}_{\theta} + \sin(\alpha - \varphi)\boldsymbol{e}_{\phi}] e^{jkR_{0}\sin\vartheta\cos(\beta - \varphi)} \quad (3)$

对于反射波辐射振幅,利用平面波菲涅尔反射 系数,可以求得

$$\boldsymbol{a}_{\mathrm{r}}(\boldsymbol{k}) = [-R_{\theta} \cos \vartheta \cos(\alpha - \varphi) \boldsymbol{e}_{\theta} - R_{\phi} \sin(\alpha - \varphi) \boldsymbol{e}_{\phi}] \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\boldsymbol{k}H \cos \vartheta} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\boldsymbol{k}R_{0} \sin \vartheta \cos(\beta - \varphi)}$$
(4)

式中: *R*_e为人射平面内的场分量菲涅尔反射系数; *R*_e为垂直于入射平面内的场分量菲涅尔反射系数. *R*_e和*R*_e表达式分别为^[11]:

$$R_{\theta} = |R_{\theta}| e^{j\Phi_{\theta}} = \frac{\varepsilon_{r}' \sin \Delta - \sqrt{\varepsilon_{r}' - \cos^{2}\Delta}}{\varepsilon_{r}' \sin \Delta + \sqrt{\varepsilon_{r}' - \cos^{2}\Delta}}$$
(5)

$$R_{\phi} = \left| R_{\phi} \right| e^{i\Phi_{\theta}} = \frac{\sin \varDelta - \sqrt{\varepsilon_{\rm r}' - \cos^2 \varDelta}}{\sin \varDelta + \sqrt{\varepsilon_{\rm r}' - \cos^2 \varDelta}} \tag{6}$$

式中:⊿为辐射仰角; ɛ,为相对复介电常数,与地面相 对介电常数和电导率有关,表达式为

$$\varepsilon_{\rm r}' = \varepsilon_{\rm r} - {\rm j} 60 \lambda \sigma_0 \tag{7}$$

将式(3)、式(4)代入式(1),并进行整理化简,得 到电偶极子总的辐射振幅

$$\boldsymbol{a}(\boldsymbol{k}) = [\cos \vartheta \cos(\alpha - \varphi) R'_{\theta} \boldsymbol{e}_{\theta} + \sin(\alpha - \varphi) R'_{\phi} \boldsymbol{e}_{\phi}] P \quad (8)$$

式中: $R'_{\theta} = 1 - R_{\theta} e^{-j2kH\cos\theta}$; $R'_{\phi} = 1 + R_{\phi} e^{-j2kH\cos\theta}$; $P = e^{jkR_{0}\sin\theta\cos(\beta-\phi)}$ $e^{jkH\cos\theta}$ 为阵列空间相位因子.

根据 ITU-R P.527-3 建议书^[13], 在短波频段不同 地面及海水相对介电常数和电导率大致取值范围如 表1 所示.

表 1 不同地面及海水相对介电常数和电导率 Tab. 1 Relative dielectric constant and conductivity of different ground and seawater

介质	相对介电常数 ε_r	电导率 $\sigma_0/(S \cdot m^{-1})$
海水	80	5
湿地面	30	10^{-2}
中等干燥地面	15	10^{-3}
极干燥地面	3	10^{-4}
冰(淡水)	3	10 ⁻⁵

对于 N 元圆形阵列, 在任意来波极化态下, 设每 个测向阵元处于不同的地面参数, 为了方便标记, 对 不同阵元做下标标记, 则水平极化圆形天线阵列接 收到信号的阵列流形可写为

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cos(\alpha_{1} - \varphi) \boldsymbol{R}'_{\theta_{1}} & \sin(\alpha_{1} - \varphi) \boldsymbol{R}'_{\phi_{1}} \\ \cos \vartheta \cos(\alpha_{2} - \varphi) \boldsymbol{R}'_{\theta_{2}} & \sin(\alpha_{2} - \varphi) \boldsymbol{R}'_{\phi_{2}} \\ \vdots & \vdots \\ \cos \vartheta \cos(\alpha_{N} - \varphi) \boldsymbol{R}'_{\theta_{N}} & \sin(\alpha_{N} - \varphi) \boldsymbol{R}'_{\phi_{N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma e^{-j\eta} \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{1} \\ \boldsymbol{P}_{2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{P}_{N} \end{bmatrix}$$
(9)

式中: [cos γ, sin γe⁻ⁱⁿ] 为来波信号极化态的 Jones 矢 量^[14]; ⊙表示矩阵的 Schur-Hadamard 积.

由于*R'_{θi}、R'_{φi}*与地面反射系数有关,即是有限导电 地面参数*ε*_r、*σ*₀的函数,这样我们就给出了含有地面 参数影响的水平极化电偶极子组成圆阵的阵列流形.

特别地,当所有测向阵元取向一致,且处于相同地面参数(即均匀地面)时,即 $\alpha_1 = \alpha_2 = \cdots = \alpha_N = \alpha_0$,并且所有测向阵元处于相同高度,归一化幅度后,有



1.2 垂直极化圆形测向阵列

对于地面上垂直极化电偶极子组成的测向阵列,测向单元沿 z 轴取向放置,测向单元距圆心半径为 R_0 ,离地面高度为 H. 将 $J(\mathbf{r}') = IL\hat{z}$ 带入式 (2),经过推导,得到直达波和反射波项,进行叠加得到其辐射振幅为 (忽略幅度常数系数 $kIL\sqrt{Z}/(4\pi j)$)

$$\boldsymbol{a}(\boldsymbol{k}) = \mathrm{e}^{\mathrm{i}\boldsymbol{k}\boldsymbol{R}_{0}\sin\vartheta\cos(\beta-\varphi)}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\boldsymbol{k}H\cos\vartheta}(1+\boldsymbol{R}_{\theta}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\boldsymbol{k}^{2}H\cos\vartheta})\boldsymbol{e}_{\theta} \qquad (11)$$

由式(11)可以看到,对于垂直极化测向,测向单 元本身响应只有垂直极化分量,无论来波极化如何 变化,其只能感应到垂直极化.

对于 N 元圆形阵列, 在任意来波极化态下, 垂直 极化圆形阵列接收到信号的阵列流形为

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} (1+R_{\theta 1}e^{-jk2H\cos\theta})\\ (1+R_{\theta 2}e^{-jk2H\cos\theta})\\ \vdots\\ (1+R_{\theta N}e^{-jk2H\cos\theta}) \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} e^{jkR_{0}\sin\theta\cos(\beta_{1}-\phi)}\\ e^{jkR_{0}\sin\theta\cos(\beta_{2}-\phi)}\\ \vdots\\ e^{jkR_{0}\sin\theta\cos(\beta_{N}-\phi)} \end{bmatrix}$$
(12)

此阵列流形表达式分解为与地面参数有关的项和基于相位中心的相位差因子两项.当所有测向阵元位于均匀地面参数时,即*R*_{e1} = *R*_{e2} = ··· = *R*_{eN},式 (12)可退化为式 (10).此时,阵列流形只与阵列空间相位差因子有关.

2 非均匀地面参数测向模型

构建 8 阵元均匀圆形测向阵列, 阵元之间夹角 为 45°, 1#阵元在 0°方向上, 阵列半径为 0.5 λ . 为验证 测向场地面电参数不均匀时对测向结果引起的误 差, 不失一般性, 本文考虑测向阵元落入两种不同的 地面参数的模型. 这在实际中也常常会遇到, 例如当 测向场地选址受限时, 测向站址不得已跨越石灰岩 地面 (低电导率区)和较为潮湿的农田土壤区域 (高 电导率区). 在测向场地内形成两个具有不同介电常 数和电导率的区域, 即测向场地的均匀性发生改变. 不妨设 1#、2#、3#、8#阵元接收射线的反射区为差电 导率的极干土区域 S₂($\epsilon_r = 2, \sigma_0 = 5 \times 10^{-4}$), 4#、5#、 6#、7#阵元接收射线的反射区为较好电导率的湿土 区域 S₁ ($\epsilon_r = 15, \sigma_0 = 1 \times 10^{-2}$), 不均匀性场地分界线 处于 110°和 290°的连线处, 如图 2 所示.



Fig. 2 Schematic of inhomogeneous ground parameters

考虑短波测向阵列两种阵列形态:水平极化和 垂直极化.水平电偶极子在 xOy 面内沿圆阵切线方 向放置,形成圆形测向阵列;垂直电偶极子沿 z 轴放 置,在 xOy 面内形成圆形测向阵列,具体示意如 图 3 所示.



图 3 水平和垂直极化两种阵列示意图

Fig. 3 Schematic of two arrays with horizontal and vertical polarization

针对 8 阵元测向系统, 采用空间谱测向方法, 考 虑空间中一个来波信号为*S*(*t*), 各路接收噪声为相互 独立的高斯噪声*N*(*t*). 由于水平电偶极子组成的圆形 阵列为异构阵列^[15], 为了突出分析地面非均匀性对 测向的影响, 只考虑匹配极化状态测向. 空间谱测向 算法由下式给出:

$$P(\vartheta, \varphi) = \frac{1}{A^{\mathrm{H}}(\vartheta, \varphi) E_{\mathrm{KC}} E_{\mathrm{KC}}^{\mathrm{H}} A(\vartheta, \varphi)}$$
(13)

式中: *E*_{кс}为接收信号的噪声特征矢量; *A*(*θ*, *φ*)为阵列 流形, 对于水平电偶极子阵列流形由式 (9) 给出, 垂 直电偶极子阵列流形由式 (12) 给出.

3 仿真结果与分析

仿真 1 非均匀地面参数对水平极化阵列测向 性能的影响.信号来波方位角从 0°到 360°连续变化. 仿真均匀地面参数和非均匀地面参数条件下不同角 度测向结果的均方根误差 (root mean square error, RMSE),其中非均匀地面 S₁区地面参数为 ε_r = 15、 σ_0 = 1×10⁻², S₂区地面参数为 ε_r = 2、 σ_0 = 5×10⁻⁴. 设 信号为窄带高斯过程, 信噪比 20 dB, 快拍数 1 024, 进行 100 次蒙特卡洛仿真. 来波信号与测向阵列极 化相同,为水平极化, 仿真频率 10 MHz, 阵列孔径 0.5λ. 仿真结果如图 4 所示.





从图 4 可以看到, 在非均匀地面的影响下, 在 110°和 290°附近出现很大测向误差, 达到 3.8°左右. 非均匀地面分界线也恰好位于 110°和 290°的连线 上, 即当来波方向从非均匀地面参数分界线附近到 达时, 具有明显的测向误差. 这与文献 [10,16] 具有相 同的定性结论, 即测向阵地选址应选择均匀地面, 不 能有明显的分界线.

为进一步分析地面参数对测向结果引起误差的本质原因,研究在不同地面参数条件下阵列流形相 位差的变化情况.图5给出了来波方向为110°时,测 向阵元在不同地面参数条件下的相位分布特性,即 测向阵列接收到的相位波前.其中1#、2#、3#、8#阵 元在 S_2 区 ($\varepsilon_r = 2, \sigma_0 = 5 \times 10^{-4}$). 4#、5#、6#、7#阵元 在 S_1 区 ($\varepsilon_r = 15, \sigma_0 = 1 \times 10^{-2}$).



从图 5 可以清楚看到,地面参数变化使得阵列 流形的相位因子整体有了偏移.相对于 S₁ 区域, S₂ 区 域阵元接收相位差整体偏小,导致 1#、2#、3#、8#阵 元接收相位差整体发生了偏移,等效接收波前相位 发生了扭曲.发生这种相位波前扭曲正是由于在测 向场地存在不同的地面参数,导致不同测向阵元的 反射波相位发生了变化,这是引起测向误差的主要 原因.

仿真 2 地面电参数连续变化对水平极化阵列 测向性能的影响. 设来波角度为 110°, 即从非均匀分 界线处照射. S₂ 区相对介电常数连续变化, ε_r从 2 变 化到 15, 最终达到与 S₁ 区地面电参数相同. 地面参 数每次发生变化时, 仿真测向结果的 RMSE. 信号为 窄带高斯过程, 信噪比 20 dB, 快拍数 1 024, 进行 100 次蒙特卡洛仿真. 来波信号与测向阵列极化相 同, 为水平极化, 仿真频率 10 MHz, 阵列孔径 0.5λ. 仿真结果如图 6 所示.



图 6 水平极化阵列测向误差随地面相对介电常数变化曲线 Fig. 6 Variation curve of DF error with relative dielectric constant for horizontal polarization array

从图 6 可以看到: 当来波沿分界线照射时, 在低 电导率的非均匀地面, 地面相对介电常数的变化对 测向误差有明显影响; 然而在高电导率的非均匀地 面上, 相对介电常数的变化对测向误差影响较小. 这 一结论为短波测向站选址提供了有意义的指导, 所 以在短波测向站选址时, 尽可能选取高电导率区域.

仿真 3 非均匀地面参数对垂直极化阵列测向 性能的影响.信号来波方位角从 0°到 360°连续变化, 仿真均匀地面参数和非均匀地面参数测向结果的 RMSE,其中非均匀地面参数设置同仿真 1条件.设 信号为窄带高斯过程,信噪比 20 dB,快拍数 1 024, 进行 100 次蒙特卡洛仿真.来波信号均与测向阵列 极化相同,为垂直极化,仿真频率 10 MHz,阵列孔径 0.5λ.仿真结果如图 7 所示.





从图 7 可以看到, 在地面参数发生变化的分界 面附近产生明显的测向误差, 达到 7°, 并且影响的测 向角度域更广.

仿真4 地面电参数连续变化对垂直极化阵列 测向性能的影响.设信号来波角度为110°,即从非均 匀分界线处照射. S₂区相对介电常数连续变化, ε_r从 2 变化到15,最终达到与 S₁区的电参数相同.信号为 窄带高斯过程,信噪比 20 dB,快拍数1024,进行 100次蒙特卡洛仿真.来波信号与测向阵列极化相 同,为垂直极化.仿真频率10 MHz,阵列孔径 0.5λ. 仿真结果如图 8 所示.





从图 8 可以看到,与水平极化阵列类似,在低电导率的非均匀地面,地面相对介电常数的变化对测向误差有明显影响,高导电区影响较小.

仿真 5 非均匀地面参数对水平极化阵列和垂 直极化阵列测向影响的差异.非均匀地面参数设置 同仿真 1条件.为了突出地面参数的效应,只考虑极 化匹配下两种阵列测向性能.信号为窄带高斯过程, 信噪比 20 dB,快拍数 1 024,进行 100 次蒙特卡洛仿 真,仿真频率 10 MHz,阵列孔径 0.5λ.图 9 和 10 分别 为非均匀地面参数对两种阵列方位角、仰角测向造成的测向 RMSE.



图 9 两种极化阵列测量误差随方位角变化曲线 Fig. 9 Curve of DF error with azimuth for two polarized





图 10 两种极化阵列测向误差随仰角变化曲线 Fig. 10 Curve of DF error with elevation for two polarized arrays

从图 9 和 10 可以看到, 在非均匀地面条件下, 两 种阵列均在地面参数分界区域产生较大测向误差, 且垂直极化阵列总体比水平极化阵列误差大 3°左右, 并且影响测向范围角度更大. 对于仰角测向性能, 非 均匀地面参数对低仰角区测向产生明显的误差, 高 仰角区域影响较小, 且垂直极化阵列受到的影响更 大. 其根本原因在于地面参数的变化对垂直极化天 线的辐射场影响更大, 所以垂直极化天线对地面条 件有着更严格的要求.

4 结 论

文中导出了含有地面参数的水平极化和垂直极 化两种典型短波测向天线的阵列流形具体表达式, 进而利用空间谱测向算法仿真分析了两种阵列在非 均匀地面参数条件下的测向误差.得出一些重要结 论:1)当测向场区存在不均匀性时,对沿着不均匀区 分界面方向的来波信号,导致波前扭曲,存在明显的 方位角测向误差,垂直于分界面方向来波测向误差 较小.同时,低仰角测向误差比高仰角测向误差要大. 2)在低电导率的非均匀地面,地面相对介电常数的 变化对方位角测向误差有着显著影响,可达到 2°~ 3°.在高电导率的非均匀地面上,相对介电常数的变 化对测向误差影响较小.3) 非均匀地面参数对垂直 极化测向误差要比水平极化误差高出 1°~ 2°左右, 垂直极化测向对地面环境有更苛刻的要求.

综上可知,在短波固定测向场地建设时,为了达 到高精度的测向效果,测向场区选址尽可能在具有 较高电导率的区域.如果选址条件难以满足,无论水 平极化测向还是垂直极化测向,至少应在测向场地 内铺设地网,以此来改善测向场地的地面均匀性.文 中只对地面参数非均匀性做了阶梯处理,得到部分 结论,对于实际复杂地形、地貌对短波测向影响还有 待进一步的研究,这也是下一步需要研究的方向.

参考文献

- [1] ADMY D L. 通信电子战 [M]. 楼才义, 等译. 北京: 电子 工业出版社, 2017.
- [2] 王鼎,吴瑛,张莉,等.无线电测向与定位理论及方法[M]. 北京:国防工业出版社,2016.
- [3] LI L T. Direction finding of shortwave emitters based on spectrum estimation[J]. Hans journal of wireless communications, 2021, 11(3): 43-50.
- [4] 芦伟东. 基于均匀圆阵的短波测向性能分析[J]. 中国无 线电, 2022(7): 41-43.
- [5] ZHANG M, TU C, ZHU W L, et al. BD-CVSA: a broadband direction finding method based on constructing virtual sparse arrays[J]. Signal processing, 2023. DOI: 10.1016/j.sigpro.2023.109160
- [6] GB/T 13614-1992短波无线电测向台(站)电磁环境要求 [S],北京:国家技术监督局,1992.
- [7] 周霞,杨琳,王英翔.短波测向定位误差分析[J].中国无 线电,2021(7):5.
- [8] 周浩,杨佳诚,田应伟,等.仿奥米亚棕蝇的小型短波天线 阵测向算法[J].华中科技大学学报:自然科学版,2021, 49(12):6.
 ZHOU H, YANG J C, TIAN Y W, et al. Ormia ochracea like direction finding with a small antenna array[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (natural science edition), 2021, 49(12):6.
 [9] 孙凤娟,柳文,李铁成.电离层对短波测向系统的影响分
 - 析[J]. 装备环境工程, 2017, 14(7): 45-49. SUN F J, LIU W, LI T C. Effects of ionosphere on highfrequency direction finding systems[J]. Equipment environmental engineering, 2017, 14(7): 45-49. (in Chinese) DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.07.009
- [10] 金元松,蔡志远,秦晋平.地面不均匀性对测向天线性能

的影响[J]. 电波科学学报, 2008, 23(5): 873-876.

JIN Y S, CAI Z Y, QIN J P. Influence of ground inhomogeneity on performance of DF antenna system[J]. Chinese journal of radio science, 2008, 23(5): 873-876. (in Chinese)

- [11] 爱金堡. 短波天线[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1965.
- [12] LOY T, LEE S W. Antenna handbook[M], New York: Chapman & Hall, 1993.
- [13] REC. ITU-R P. 527-3: electrical characteristics of the surface of earth[S], 1992.
- [14] 庄钊文等. 雷达极化信息处理及其应用[M]. 北京: 国防工 业出版社, 1999.
- [15] REN X F, GONG S X. Direction of arrival estimation based on heterogeneous array[J]. Progress in electromagnetics research M, 2018, 69: 97-106.
- [16] 燕小山, 尹文禄, 杨慎谦. 垂直导体对短波测向精度影响 分析[J]. 电信技术研究, 2012(1): 41-44.

(上接第 690 页)

- [22] KRALL J, HUBA J D, FRITTS D C. On the seeding of equatorial spread F by gravity waves[J]. Geophysical research letters, 2013, 40: 661-664. DOI: 10.1002/GRL. 50144
- [23] SOICHER H, GORMAN F, TSEDILINA E E, et al. Spread-F during quiet and disturbed periods at midlatitudes[J]. Advance space research, 1997, 20(11): 2199-2202.
- [24] HANSON A, PNVR K, KRISHNAGOPAL S, et al. Bidirectional convolutional LSTM for the detection of violence in videos[J]. ECCV 2018 workshops, LNCS 2019, 1113, 0: 280-295.
- [25] EL-AMIR H, HAMDY M. Deep learning pipeline: building a deep learning model with tensorflow[M/OL]. ISBN-13 (electronic): 2020, 978-1-4842-5349-6, https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5349-6
- [26] JONAS E, BOBRA M G, SHANKAR V. Flare prediction using photospheric and coronal image data[J]. Solar physics, 2018, 293: 48.
- [27] LIU J J, YE Y D, SHEN C L, et al. A new tool for CME ar-

作者简介

任晓飞 (1981—), 男, 陕西人, 中国电波传播研究所高级工程师, 工学博士, 研究方向为宽带阵列天线、智能天线和阵列信号处理等. E-mail: renxf@crirp.ac.cn

李虎 (1974—),男,安徽人,中国电波传播研究所高级工程师,硕士,研究方向为天线理论与工程、短波天线阵列等. E-mail: lihu6999@163.com

朱金鹏 (1976—),男,安徽人,中国电波传播 研究所研究员,工学博士,研究方向为小型化天线、 短波相控阵天线等. E-mail: zhujp@crirp.ac.cn

> rival time prediction using machine learning algorithms: CAT-PUMA[J]. The astrophysical journal, 2018, 855: 109.

- [28] TAN Y, HU Q, WANG Z, et al. Geomagnetic index Kp forecasting with LSTM[J]. Space weather, 2018, 16: 406-416.
- [29] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural computer, 1997, 9(8): 1735-1780.

作者简介

孙树计 (1981—), 男, 河南人, 中国电波传播研 究所研究员, 博士, 主要研究方向为无线电传播及其 影响. E-mail: shuji_sun@126.com

徐彤 (1981—),男,江苏人,中国电波传播研究所研究员,博士,主要研究方向为电离层物理及电波传播. E-mail: xutong1104@163.com

班盼盼 (1984—), 女, 河南人, 中国电波传播 研究所高级工程师, 主要研究方向为电波传播和电 离层短期预报. E-mail: bpp432@163.com