

电离层对短波测向系统的影响分析

孙凤娟, 柳文, 李铁成

(中国电子科技集团公司第二十二研究所, 山东 青岛 266107)

摘要: **目的** 研究电离层对短波测向系统的影响。**方法** 从电离层传播介质入手, 分析路径偏离效应和波干涉效应的形成机理及其对短波测向的影响。**结果** 电离层系统倾斜引起的测向误差可借助电离层长期预测模型、短期预测算法或电离层实时探测数据对测向方位偏差进行补偿。行波扰动不可预测, 只能依据行波扰动观测结果进行测向误差校正。波干涉误差可通过时间平滑进行抑制。**结论** 提升现有短波测向系统测向性能的根本途径是为短波测向系统配备电离层探测设备, 准确获取系统覆盖区内电离层状态信息, 并进行传播效应补偿。

关键词: 电离层; 短波测向; 路径偏离效应; 波干涉效应; 行波扰动; 系统倾斜

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.07.009

中图分类号: TJ06; TN011

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)07-0045-05

Effects of Ionosphere on High-frequency Direction Finding Systems

SUN Feng-juan, LIU Wen, LI Tie-cheng
(CETC No. 22 Research Institute, Qingdao 266107, China)

ABSTRACT: Objective To study effects of ionosphere on high-frequency direction finding systems. **Methods** The basic characteristics of ionosphere were firstly introduced, the formation mechanism of path deviation effect, wave-interference effect and its influences on HF direction finding were analyzed. **Results** With the ionospheric long-term prediction model, short-term prediction algorithm or ionospheric real-time sounding data, the error caused by ionospheric system tilt could be compensated. Traveling wave disturbances could not be predicted and the error caused by traveling wave disturbances could only be corrected based on the observed results of traveling wave disturbance. Time smoothing could suppress the wave interference error. **Conclusion** The basic way to improve the performance of HF direction finding system is to provide the ionospheric sounding equipment, to obtain the information of the ionospheric state in the coverage area and to carry out the compensation of the propagation effect.

KEY WORDS: ionosphere; hf direction finding; path deviation effect; wave-interference effect; traveling wave disturbance (TID); systemic tilt

短波测向系统借助电离层反射能够实现对远距离、大范围内短波辐射源的测向定位, 是监测远距离干扰源的重要手段。然而, 电离层具有随机时变、各向异性、色散、非均匀等复杂特性, 是影响短波测向系统作战性能的关键因素。大量试验数据表明, 中纬

度地区, 电离层倾斜和扰动会使测向误差增大 $1^{\circ}\sim 4^{\circ}$, 最大可达到 7° 以上, 大尺度行波扰动发生时甚至可引起高达十几度的测向误差。因此, 深入分析电离层对短波测向精度的影响, 探讨消减或补偿其影响的措施对提升短波测向系统作战性能具有明确的指导意义。

收稿日期: 2017-03-20; 修订日期: 2017-05-08

基金项目: 国家自然科学基金 (61331012)

作者简介: 孙凤娟 (1981—), 女, 山东沂南人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向电离层传播特性及其对短波系统性能影响。

文中从分析电离层结构特点及其变化规律入手,研究了电离层路径偏离效应和波干涉效应对短波测向的影响,并提出了应对措施。

1 电离层的结构特点及其变化规律

1.1 电离层的结构特点

电离层是地球高层大气被电离的部分^[1]。它是由太阳高能电磁辐射,宇宙射线和沉降粒子作用于地球高层大气,使大气分子发生电离,产生大量的自由电子、离子和中性分子,而构成能量很低的准中性等离子区域。该区域高度大约在 60~1000 km。

电离层按电子浓度的高度变化可分为 D 层、E 层和 F 层, F 层白天又可分为 F1 层和 F2 层。电离层各层的物理和化学变化与太阳散射、粒子散射、磁层扰动、电磁场变化及高层大气运动密切相关^[2], 常规电离层的分层状况和基本特点见表 1。

表 1 常规电离层分层状况和基本特点

电离层	D层	E层	F1层	F2层
区域范围/km	60~90	90~140	140~200	200~500
最大电离高度/km	75~80	100~120	160~200	250~450
电子浓度/ cm^3	$10^2\sim10^4$	$10^3\sim10^5$	10^5	$10^5\sim10^6$
基本特点	日出而生, 日落而息, 夜间没有影响, 白天主要起吸收作用, 不能反射短波信号	中午达到最大电离值, 之后逐渐减小; 可以吸收、反射短波信号	F1层常出现在夏季白天, 夜间消失	F2层电子浓度白天高, 夜间低, 冬季高, 夏季低; 对于短波传播来说, F层是主要的反射层

1.2 电离层的变化规律

由于大气结构和电离源的随机变化, 电离层是一种随机的时空变化媒质。电离层的分层状况及各层的电子浓度、半厚度、高度等参数随地理位置、季节以及太阳活动性而发生较大变化。这些变化可分为规则变化和随机不规则变化^[1]。

电离层的规则变化有:

1) 日变化, 日出之后, 各电离层的电子浓度不断增加, 到正午稍后时分达最大值, 之后逐渐减小。一日之内, 日出和日落时分电子浓度变化最快。

2) 季节变化, 由地球环绕太阳公转引起。F1 层多出现在夏季白天, F2 层的高度夏季高冬季低, 而电子浓度却是冬季大夏季小, 并且一年中春分和秋分两次达到最大值。

3) 黑子活动周期变化, 与黑子活动正相关, 呈现出 11 年周期变化。

4) 纬度变化, 由太阳照射角的不同引起, 最大电子浓度随纬度的增大大致减小, 存在赤道异常和中纬度槽等现象。

电离层的不规则变化有:

1) Es 层 (突发 E 层), 出现在 E 层高度上, 是电子浓度很高的云状物, 能遮蔽上层回波, 限制信号传输距离。

2) 扩展 F 层, 发生在 F 区的突发不均匀结构, 能使回波发生扩散, 导致接收回波发生严重衰落。

3) 电离层行波扰动 (TID), 是 F 区一种类似波浪运动的大尺度不均匀结构, 它使电子浓度等值面作波状运动, 从而导致无线电波传播轨迹发生变化。

4) 突然电离层骚扰 (SID), 由太阳风暴引起, 使日照面电离层 D 层吸收增大, 导致短波传输信道突然中断。

5) 电离层暴, 由太阳风暴引起, 可使电子浓度降低, 链路最高可用频率下降。

2 电离层对短波测向的影响

短波测向误差是由设备测量误差和电离层电波传播误差两部分因素引起的。然而, 随着新体制测向系统的出现和系统建设水平的不断提升, 系统测量误差逐渐减小, 电离层传播效应引起的误差日渐突出。大量观测数据显示^[3-7], 引起短波远距离测向误差的主要电离层传播效应可归纳为路径偏离效应和波干涉效应两类。

2.1 路径偏离效应对短波测向影响

路径偏离效应通常由电离层倾斜引起, 会使电波射线在传输过程中偏离原包含发射点至接收点的大圆平面, 导致测得的示向度与目标真实方位角之间存在偏差。路径偏离效应引起测向偏差如图 1 所示。图 1 中, A 点发射信号偏离原大圆路径 $\widehat{AOR}$ 到达测向站 R, 呈现出的示向指向 B 点所在的大圆平面 $\widehat{BO'R}$, 引起 $\Delta\varphi$ 的测向偏差。

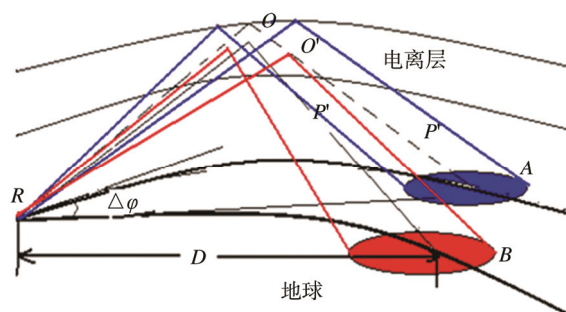


图 1 电离层倾斜引起测向偏差

电离层倾斜由太阳规则变化引起的电离层系统

倾斜和电离层随机扰动两种原因引起。

电离层系统倾斜主要发生在寂静电离层状态下的日出时段和日落时段，尤以日出时段更加明显，引起的测向偏差在几度量级。某南北向传输链路上观测到的测向误差随太阳天顶角余弦的变化关系如图 2 所示^[8]。可以看出，负的测向误差观测于午夜至正午时段，表明电离层电子浓度等值线由西向东逐渐降低；正的测向误差观测于正午至午夜时段，此时电子浓度等值线由东向西往低处走；而在午夜或是正午时分，电离层系统倾斜引起的平均测向误差几乎为 0。

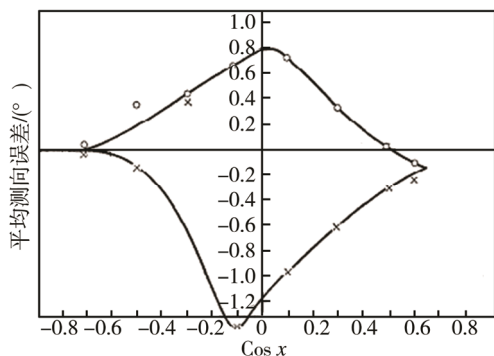


图 2 电离层系统倾斜引起测向偏差

电离层系统倾斜最早由 Ross 等人^[9]测量距测向站 400 km 处的短波发信源方位角时发现，当时他们观测到方位角偏离原大圆路径 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ，意味着试验期间存在非常大的等效电离层倾斜。除此之外，他们还将测量得到的偏角与电离层垂直探测获得的等效反射高度进行了定性比较，发现二者具有较好的一致性。之后，大量学者深入研究了电离层系统倾斜引起的测向偏差，并得出了很多有意义的结论。

1) 测向偏差随信号频率偏离链路 MUF（最大可用频率）距离的增大而减小。

2) 观测到的方位偏差通常沿 F1 层或 F2 层传播，E 层信号经电离层传输时一般沿原大圆路径传播^[10]。

3) 最大测向偏差发生在日出后 1 h 左右，而非日出时刻。

4) 测向偏差与信号在电离层中的穿透深度有关，穿透深度越大，测向偏差越大。

尽管寂静电离层条件下小尺度不均匀体也会引起路径偏离效应，但是电离层随机扰动中行波扰动引起的电离层倾斜更普遍。电离层行波扰动引起的路径偏离可使测量方位角出现周期性起伏，如图 3 所示，周期为几分钟至几十分钟不等。一般大尺度行波扰动周期在 30 ~ 60 min 量级，而中尺度行波扰动在 10 ~ 40 min 量级。

行波扰动引起的时变路径偏离效应最早由 Bramley 等人^[11]于 1951 年观测 1 跳 F 模式信号到达

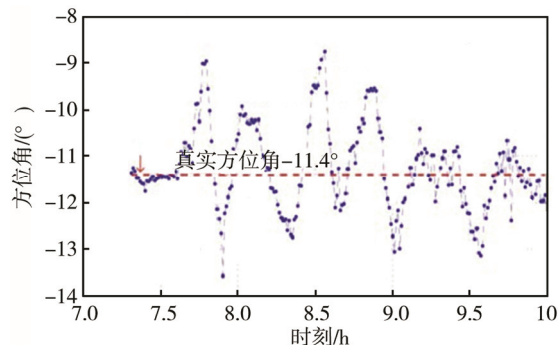


图 3 实测行波扰动引起的测量方位角周期起伏

角时发现，随后很多学者对该现象进行了研究。对中纬度地区来说，行波扰动引起的测向偏差约占总误差的 2/3，通常在 $1^{\circ} \sim 4^{\circ}$ 范围内，而当大中尺度行波扰动发生时甚至能引起几十度的测向偏差。不过，大尺度行波扰动只是时有发生，而中等尺度行波扰动却一直存在。Hawlitshka 采用超分辨率高频测向系统对中纬度地区行波扰动进行了为期 3 年的观测研究^[12]。观测结果表明，中纬度地区，白天发生的大尺度行波扰动多与磁暴 ($k > 2$) 有关，通常发生时间晚于磁暴时间约 2 h，夜晚低地磁活动时也会发生大尺度行波扰动；中等尺度行波扰动存在于试验的整个阶段，与白天、夜晚以及地磁活动性无关。

2.2 波干涉效应对短波测向影响

电离层的分层结构使穿越其中的电磁波以多个模式传播，如不同反射层传播模式，同一反射层的高、低角模式，地磁场导致的寻常波 (O 波) 和非常波 (X 波) 模式以及不同层之间的混合模式 (如 EF 模式) 等，如图 4 所示。这样一来，到达测向阵的信号由相互干涉的多个波束构成，并且每个波束又由反射分量和围绕其周围的散射分量组成，最终导致被测信号的示向度在很大范围内快速游动，引起较大测向误差。

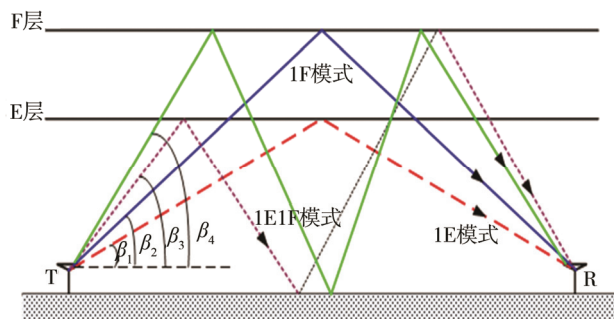


图 4 电离层多模式传播

对于中纬度、中等距离传输链路上单个传播模式信号来讲，围绕在反射分量周围的散射分量，其角谱能量分布较窄，可用单个射线近似。这种情况下，波干涉误差主要来源于两个或两个以上传播模式之间

以及单个传播模式中寻常波和非常波的相互作用。即使是在这种相对简单的条件下,测量得到的方位角通常也有几度的误差,误差的大小与取向时长和天线阵孔径有关。

3 应对电离层效应的措施

上一节分析表明,电离层路径偏离效应和波干涉效应引起测向误差的机理不同,测向误差的表现特征也不相同。因此,消减或补偿这两种效应影响的措施也存在差异。

1) 应对电离层系统倾斜的措施。对于太阳规则变化引起的电离层系统倾斜误差,由于电离层规则变化具有一定的可预测性,可借助电离层长期预测模型、短期预测算法或电离层实时探测数据,通过评估电离层等效倾斜引起的方位偏差进行补偿。许多学者研究分析了特定链路上不同时刻计算方位角与观测方位角之间的关系,证明了系统倾斜误差具有补偿性^[13—17]。如 Rao 采用三维射线追踪技术,结合 5 个电离层垂测站实时探测结果,仿真计算了夜间 Houston-Urbana 链路 1 跳 F 层到达方位角^[18—19]。通过将它与实测方位角进行比对发现,二者吻合得非常好。

2) 应对行波扰动的措施。行波扰动可由不稳定的等离子体或中性风引起,它随机产生和消失,基本不可预测。因此,很难通过预测方法对行波扰动引起的路径偏差效应进行补偿,只能依据行波扰动观测结果进行测向误差校正。行波扰动引起测向误差的校正方法通常由下列三种^[20]:采用多普勒探测网确定行波扰动的存在,并计算其传输方向、速度等参数,最后通过确定电离层倾斜角的方式计算测向偏差并进行补偿;对斜向传输链路的多普勒频移进行测量,利用多普勒频移与方位偏角之间的相关性进行测向误差校正;利用电离层垂直探测网确定行波扰动的存在,计算相关尺寸参数并进行建模,然后利用射线追踪技术确定方位偏差并进行补偿。

3) 应对波干涉误差的措施。在时间允许的情况下,波干涉误差通常可采用对连续多组快速测向结果进行时间平滑的方式进行抑制。观测数据表明^[21—22],中纬度地区中等距离传输链路上干涉误差的典型均方根误差为 2°,而经过 2.5 min 的时间平滑后,该误差的典型值可降为原来的 1/3。对于猝发等短时信号而言,由于缺乏足够的取向时间,可采用空域平滑技术进行误差抑制。所谓空域平滑技术是指采用大孔径、具有锐方向特性的测向系统进行角谱测量。此方法要求角度测量期间信号角谱包络维持不变,并且为了精确重构该角谱包络,角度采样间距应该足够小,致使空域平滑技术的实际使用性能受到约束。

4 结语

短波测向系统为典型的环境依赖性系统,其测向性能受电离层电波传播效应影响较大。文中通过归纳分析主要电波传播效应——路径偏离效应和波干涉效应对短波测向的影响,探究消减或补偿这些效应影响的基本方法,得出了以下结论:为短波测向系统配备电离层探测设备,准确获取系统覆盖区内电离层状态信息,并进行传播效应补偿是提升现有短波测向系统测向性能的根本途径。

参考文献:

- [1] 焦培南, 张忠治. 雷达环境与电波传播特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [2] 戴耀森. 短波数字通信自适应选频技术[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1990.
- [3] GETHING P J D. High-frequency Direction Finding[J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 113: 49—56.
- [4] HAWLITSCHKA S. Travelling Ionospheric Disturbances (TIDS) and Tides Observed by a Super-resolution HF Direction Finding System[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2006, 68: 568—577.
- [5] BAILEY A D. An Investigation of the Direction of Arrival of Radio Waves[D]. Illinois: University of Illinois, 1954.
- [6] Bramley E.N. Some Comparative Directional Measurements on Short Radio Waves over Different Transmission Paths[J]. Proceedings of the IEEE, 1955, 102B: 544—549.
- [7] BRAMLEY E N. Directional Observations on HF Transmissions over 2100 km[J]. Proceedings of the IEEE, 1956, 103B: 295—299.
- [8] MORGAN A D. A Qualitative Examination of the Effect of Systematic Tilts in The ionosphere on HF Bearing Measurements[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1974, 36: 1675—1682.
- [9] ROSS W, BRAMLEY E N. Lateral Deviation of Radio Waves at Sunrise[J]. Nature, 1947, 159: 132—136.
- [10] BAULCH R N E, BUTCHER E C. Direction of Arrival of Radio Waves Reflected from the E-region[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1979, 40: 1235—1243.
- [11] BRAMLEY E N, ROSS W. Measurements of the Direction of Arrival of Short Radio Waves Reflected at the Ionosphere[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1951, 207A: 251—262.
- [12] HAWLITSCHKA S. Travelling Ionospheric Disturbances (TIDS) and Tides Observed by a Super-resolution HF Direction Finding System[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2006, 68: 568—577.
- [13] 赵志安. 电离层大尺度倾斜对电波传播的影响[J]. 电波科学学报, 1986(2): 44—45.
- [14] STEIN S. The Role of Ionospheric Layer Tilts in Long-

- range High-frequency Radio Propagation[J]. Journal of Geophysical Research, 1958, 63: 217—241.
- [15] TITHERIDE J E. Variations in the Direction of Arrival of High-frequency Radio Waves[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1958, 13(1): 17—25.
- [16] WHALE H A, DELVES L M. Some Relations between the Bearing and Amplitude of a Fading Radio Wave[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1958, 13 (1/2): 72—85.
- [17] RAO N N. Ray-tracing Investigation of Direction of Arrival Observations of HF Radio Waves[J]. Radio Science, 2016, 3(8): 796—802.
- [18] RAO N N. Bearing Deviation in HF Transionospheric Propagation 1: Exact Computations for Some Ionospheric Models with no Magnetic Field[J]. Radio Science, 1968, 3(12): 1113—1118.
- [19] RAO N N. Bearing Deviation in HF Transionospheric Propagation 3: Ray Tracing Investigation of the Magnetioic Effect[J]. Radio Science, 1969, 4(2): 153—161.
- [20] JONES T B, REYNOLDS J S B. Ionospheric Perturbations and Their Effect on the Accuracy of h. f. Ditection Finders[J]. The Radio and Electronic Engineer, 1975, 45: 63—75.
- [21] BAIN W C. Calculation of Wave Interference Errors on a Direction-finder Employing Cyclical Differential Measurements of Phase[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 100 (67): 253—261.
- [22] BECKWITH R I. An Investigation of Directional Propagation Effects in High-frequency Radio Source Location[D]. Illinois: University of Illinois, 1972.