

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)

中国超星期刊域出版平台国家科技学术期刊开放平台

• 中文科技期刊数据库

• 万方数据知识服务平台

- •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)

电离层虚高对超视距雷达多站联合定位精度的影响

张旭辉, 姜春华, 刘桐辛, 杨国斌, 赵正予

Effect of the ionospheric virtual height on the joint positioning accuracy of multi-station over-the-horizon radar system

ZHANG Xuhui, JIANG Chunhua, LIU Tongxin, YANG Guobin, and ZHAO Zhengyu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12265/j.cjors.2021236

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

天线时域平面近场测试的误差分析

Error analysis on time domain planar near-field antenna measurement 电波科学学报. 2017, 32(1): 112-120

基于TDOA/FDOA多星联合定位误差与卫星构型分析

TDOA/FDOA joint location errors and satellite configuration for passive multi-satellite localization systems 电波科学学报. 2018, 33(5): 565-574

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

大气波导对无源定位差分时延精度的影响

Impact of atmospheric duct on time difference precision of passive location system 电波科学学报. 2020, 35(6): 847-855

基于抛物方程的短波电离层传播数值模拟研究

Numerical simulation of ionospheric propagation loss at HF based on parabolic equation 电波科学学报. 2019, 34(5): 545-551



关注微信公众号,获得更多资讯信息

张旭辉,姜春华,刘桐辛,等.电离层虚高对超视距雷达多站联合定位精度的影响[J].电波科学学报,2022,37(5):761-767+792.DOI: 10.12265/j.cjors.2021236

ZHANG X H, JIANG C H, LIU T X, et al. Effect of the ionospheric virtual height on the joint positioning accuracy of multi-station over-the-horizon radar system [J]. Chinese journal of radio science, 2022, 37(5): 761-767+792. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2021236

电离层虚高对超视距雷达多站联合定位精度的影响

张旭辉! 姜春华!* 刘桐辛! 杨国斌! 赵正予1,2

(1. 武汉大学电子信息学院, 武汉 430072; 2. 哈尔滨工业大学(深圳), 深圳 518055)

摘要在天波超视距雷达系统的短基线多站联合定位中,一般假设多站点电离层反射虚高保持一致,为确定这一假设对定位结果的影响,本文进行电离层探测试验,以研究电离层虚高对多站联合定位精度的影响. 试验时分别架设两个接收站模拟短基线超视距雷达系统的接收站点,再在较远距离架设目标站点,利用来自目标站点的发射信号模拟目标的返回信号.本文假设参考站点到目标站点链路的电离层反射虚高和大圆距离是已知的,对于同一工作频率,利用参考站点-目标站点链路上的电离层虚高,去解算定位站点-目标站点之间的大圆距离.参考站点和定位站点相距约90 km 情况下,结果显示:目标和定位站(道孚-武汉)大圆距离约为1260 km 时,两条链路的虚高均方根误差约为5.82 km,相应的大圆距离的定位均方根误差约为5.02 km,相对误差约为0.34%;当目标和定位站(乐山-武汉)大圆距离约为1000 km 时,误差分别约为5.5 km,5.69 km 和0.46%. 试验结果和理论分析表明,可以从缩短接收站点的布局和降低电离层反射虚高两个方面进一步提高目标定位的精度.本文试验结果可为短基线天波超视距雷达的建设提供较为重要的参考价值.

关键词 超视距雷达;电离层虚高;多基地雷达;目标定位;误差分析

中图分类号 TN953⁺.7 文献标志码 A 文章编号 1005-0388(2022)05-0761-07 DOI 10.12265/j.cjors.2021236

Effect of the ionospheric virtual height on the joint positioning accuracy of multi-station over-the-horizon radar system

ZHANG Xuhui¹ JIANG Chunhua^{1*} LIU Tongxin¹ YANG Guobin¹ ZHAO Zhengyu^{1,2}

School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
 Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract In the short baseline multi-station joint positioning of skywave over-the-horizon-radar(OTHR) system, the ionospheric virtual height of different propagation links of radio waves is generally assumed to be equal. In order to search the effect of this assumption on the positioning results, we conduct observation experiments to study the influence of ionospheric virtual height on the accuracy of multi-station joint positioning. In the experiment, two receiver stations are set up to simulate the receiver station of the short baseline OTHR system, and then the target station is set up at a long distance. We simulate the reflected wave of the target by using the transmitted wave from the target station. This paper assumes that the ionospheric virtual height and the great circle distance of the link from the reference station to the target station are known. In this case, for the same operating frequency, the great circle distance between the positioning station and the target station is calculated by using the ionospheric reflected virtual height on the reference and target stations. The results show that when the distance between the reference station is about 90 km meanwhile the great circle distance between the target and the positioning station (Daofu-Wuhan) is about 1 260 km, the root mean square error of the virtual height of the two

资助项目:国家自然科学基金(42074184, 41727804, 42104151)

收稿日期: 2021-08-30

通信作者: 姜春华 E-mail: chuajiang@whu.edu.cn

links is about 5.82 km, the positioning root mean square error of the great circle distance is about 5.02 km, and the relative error is about 0.34%. When the great circle distance (Leshan-Wuhan) is about 1 000 km, the errors are about 5.5 km, 5.69 km and 0.46%, respectively. The experimental results and theoretical analysis show that the accuracy of target positioning can be further improved by shortening the layout of receiving stations and reducing the ionospheric virtual height. The experimental results can provide some reference value for the construction of short baseline skywave OTHR.

Keywords over-the-horizon radar(OTHR); ionospheric virtual height; multi-station radar system; target positioning; error analysis

引 言

天波超视距雷达利用电离层对电磁波的反射实 现对视距之外的目标探测,被广泛应用于军事领域, 在国防体系中占有很重要的地位.天波雷达最早出 现在二战期间,战后各国注意到高频信道传输的价 值,纷纷投入研究,天波雷达技术得以不断的完善, 我国天波雷达的发展也有 40 多年的积累^[1-2].

天波雷达的一个功能是进行超视距的目标定 位,单基地的天波雷达可以获取远距离目标的位置, 但是定位过程必须结合当时的电离层信息,往往需 要额外的电离层探测设备进行同步的主动探测,比 如电离层垂测仪、斜测仪、斜向返回探测仪等,这将 会大大增加系统的复杂程度,使得雷达的成本大大 增加,而且不利于电磁兼容的设计,对雷达性能会造 成一定的影响,同时单站定位中的测向和测高误差 会导致不能接受的误差^[3-4].随着电子对抗技术的不 断发展,单基地雷达在战场上的生存形势很不乐观, 而收发分置的多基地雷达则有着很好的四抗性能, 受到了各国广泛的关注^[5].

在多基地天波雷达系统中,则需要考虑不同接 收站点电离层的状态.电离层模式和实时状态会影 响电波反射时的虚高,进一步对坐标配准产生系统 性的误差,因此会给目标定位带来困难.在雷达系统 中,测量过程存在电离层虚高、雷达回波到达角测不 准的问题,严重影响目标定位的精度^[6].

对于虚高的测不准,即使有较好的电离层诊断 系统,虚高的测量误差也会在十几千米.贺承杰^[7] 的仿真试验表明,在进行大圆距离约为2133 km 的目标定位时,标准差为15 km 的电离层虚高测量 误差引起的目标定位均方差为8.2 km.对于标准差 为0.4°的方位角误差,在同等条件下会引入13.7 km 的定位均方差,二者联合则会引入16.2 km 的均方 差.贺青等^[8]基于圆概率误差分析了在单站无源定 位中电离层虚高误差对定位的影响. 攸阳等^[9]提出 一种基于电离层射线追踪技术的时差定位技术,并 在此基础上仿真分析了电离层参数对定位精度的影响,结果表明电离层测量误差对定位精度影响较大.

Cilliers 等^[10]提出了一种计算机电离层断层扫描 方法,此方法的效果比垂测仪好,可以提升电离层信 息的估计精度,从而提高定位精度.为了提高测向性 能,Svantesson 等^[11]提出利用开关寄生天线的方向辐 射模式进行测向的方法,使得测向的分辨率有了显 著提升.当通过不同电离层传输的多个回波具有近 似独立的衰落特性叠加在一起的时候,可能会导致 更严重的跟踪问题,甚至使雷达完全失效.针对多径 传输问题,可以采用交叉模糊性函数-方向搜索 (cross ambiguity function-direction finding, CAF-DF)算法进 行波达方向 (direction of arrival, DOA) 估计^[12].

韩彦明[13]研究了虚高测量误差和方位测量误差 对目标定位的影响,结果表明影响大圆距离解算误 差的主要因素是虚高测量误差,基于此给出了可能 的定位精度提升的途径 (一个是电离图智能判读方 法的改进,一个是利用信标回波自动检测和识别),并 且对无源信标定位修正方法进行了研究,通过实测 目标数据比对,定位精度有所提高.宋君门对多站定 位的误差进行了系统的研究,仿真结果显示三角站 型比线性站型的精度更高,且在延展基线至 300 km 的情况后,仿真结果显示在一定范围里,接收站离主 站距离越远,定位精度越高.此种方法虽定位精度很 高,但需要准确知道电离层虚高信息.贺承杰[7]提出 了一种短基线多站定位算法,并验证了这种方法的 可行性.其原理是在单站定位的基础上,构建多个类 似的方程,把方位角和电离层虚高当作未知量,直接 解算出目标的位置,使得目标定位的精度大大提高. 但是方程的联立求解需要假设各条电波路径的反射 点虚高是一致的,否则会引入多余的变量,使得方程 组没有唯一解.

本文利用短基线的两个电离层观测站点仙桃站 和武汉站(相距约为90km),接收较远距离的四川道 孚站和乐山站的电离层斜测信号,分析电离层反射 虚高对短基线多站雷达目标定位精度的影响.

1 定位原理

多站定位的算法思想是基于单站定位原理构建 多个方程,从而联立求解得到方程解.单站定位时, 发射站发射的电波经目标散射后由接收机接收,记 录时延t,可以求得群路径P=ct,c是真空中的光速. 利用电离层探测设备可以得到电离层信息,比如通 过斜向返回探测系统可以获得电子浓度剖面^[14-15],再 通过射线追踪得到反射点虚高h,如图 1(a)所示,其 中 T/R 表示收发同址的超视距雷达,O表示目标, C 表示地心.结合地球半径R,运用 Martyn 等效定理 可以构建一个三条边长度已知的三角形,如图 1(b) 所示.





Fig. 1 Schematic diagram of the single site location (a) and triangle constructed according to Martyn's equivalence theorem (b)

在图 1(b) 中, 可以利用余弦公式和弧长公式得到:

$$\theta = \arccos\left(\frac{R^2 + (R+h)^2 - \left(\frac{P}{2}\right)^2}{2R(R+h)}\right),\tag{1}$$

$$D = 2R\theta. \tag{2}$$

将式(1)代入到式(2)得到大圆距离D,也即单 站定位的距离计算公式:

$$D = 2R \arccos\left(\frac{R^2 + (R+h)^2 - \left(\frac{P}{2}\right)^2}{2R(R+h)}\right).$$
 (3)

多站定位相当于构建了多个单站定位的方程, 联立求解即可得到目标的经纬度,如式(4)所示:

$$\begin{cases} P_{1} = \frac{2\sigma_{1}a\sqrt{1+e'^{2}}}{k_{1}(1+e'^{2}\cos^{2}B_{1})} \\ P_{2} = \frac{\sigma_{1}a\sqrt{1+e'^{2}}}{k_{1}(1+e'^{2}\cos^{2}B_{1})} + \frac{\sigma_{2}a\sqrt{1+e'^{2}}}{k_{2}(1+e'^{2}\cos^{2}B_{2})} \\ P_{3} = \frac{\sigma_{1}a\sqrt{1+e'^{2}}}{k_{1}(1+e'^{2}\cos^{2}B_{1})} + \frac{\sigma_{3}a\sqrt{1+e'^{2}}}{k_{3}(1+e'^{2}\cos^{2}B_{3})} \\ \sigma_{j} = \arccos\left(\sin B_{0}\sin B_{j} + \cos B_{0}\cos B_{j}\cos\left(L_{0} - L_{j}\right)\right) \\ P_{j} = ct_{j}, j = 1, 2, 3 \end{cases}$$

$$(4)$$

式中: P_j 、 t_j (j = 1, 2, 3, j = 1表示主站)为由主站发出、 j站接收的电波群路径和群时延; σ_j 为j站到目标的大 圆距离 (单位为弧度); a 为地球大半轴,取 6 378.245 km; $e^{r_2} = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$ 为第二偏心率的平方, b 为地球小半 轴,取 6 356.863 km; k_j 为由目标到j站对应的 P-D 变 换系数; (B_0, L_0)为目标的经纬度; (B_j, L_j)为各个站点 的经纬度; c 是光速.

2 电离层虚高对目标大圆距离解算误 差分析

多站定位算法假设多个反射点位置处的坐标配 准系数一致即虚高一致,从而对方程组进行联立求 解,而实际不同链路的反射点虚高并不一定相等,由 此会引入多站联合定位的模型误差.

在大圆距离解算时,不同的链路采用一致的虚 高会产生误差,如果该虚高比实际虚高大,会使得解 算出来的大圆距离偏小,反之偏大,示意图见图 2.





假设虚高一致, 用 h_2 代替实际的虚高 h_1 去解算大圆距离, 由于 $h_2 > h_1$, 得到的大圆距离会偏小.

进一步探究虚高对大圆距离的影响,对式(3)的两边进行求导得^[13]:

$$\Delta D = 2R \left[\frac{1}{(R+h)\tan(D/2R)} - \frac{1}{R\sin(D/2R)} \right] \Delta h.$$
(5)

式中: ΔD是地面距离误差; Δh是实际的虚高差.

3 试验与分析

由于超视距雷达进行目标探测时接收的回波信 号是经由电离层反射的双程斜测信号,本次试验主 要模拟的是目标经过电离层反射到达接收站点的单 程斜测路径.在前期的电离层斜测试验中,周晨等^[16] 对电离层高频信道互异性进行了分析,发现双程斜 测两条路径的群时延和散射函数都具有较好的互异 性.因此本文近似认为双程斜测中目标返回信号和 发射信号的路径是重合的,可以认为双程传输条件 下的误差和单程条件下是近似一致的.

3.1 试验介绍

武汉大学电离层实验室开发研制的武汉电离层 探测系统 (Wuhan Ionosphere Sounding System, WISS) 具有电离层垂直探测、斜向探测和斜向返回探测等 功能,为电波传播工程应用提供了一个良好的平台. 本文利用四川乐山和道孚、湖北仙桃和武汉等地区 部署的 WISS 观测站进行本次验证试验. 试验中四个 站点的位置信息分别是: 道孚 (31.0°N, 101.12°E)、乐 山 (29.6°N, 103.75°E)、仙桃 (30.2°N, 113.53°E)、武汉 (30.5°N, 114.37°E), 站点分布如图 3 所示. 其中道孚-仙桃大圆距离 1 190 km, 道孚-武汉 1 266.5 km, 乐山-仙桃 945 km, 乐山-武汉 1 026 km, 仙桃-武汉 87 km, 工作方式为道孚、乐山同步发射,武汉、仙桃同步接 收,由此可得道孚-仙桃、道孚-武汉、乐山-仙桃和乐 山-武汉四条链路.由于试验时各探测系统收发异地, 本系统采用时频同步模块(支持 GPS 和北斗系统)为 整个探测试验提供校准的时钟和秒脉冲,以保证各 个站点之间的时频同步.另外,针对各站点探测系统 的内部时延,试验之前在武汉站对其进行了统一 校准.

在本次试验中,道孚和乐山模拟两个不同地面 距离的目标,为目标站点,其发射的斜测信号模拟目 标的散射信号;仙桃和武汉用来模拟多基地雷达定 位中的两个接收站点,其中将仙桃站点作为参考站 点,武汉站点作为解算和目标大圆距离的定位站点.

试验流程见图 4,目标站点和参考站点的大圆距 离 D_{ref} 和群距离 P_{ref} 已知,利用 D_{ref} 和 P_{ref} 计算该条链路 的电离层反射虚高 h'_{ref} ,然后利用 h'_{ref} 和定位站点测得 的目标站点群路径信息P可以解算目标站点和定位 站点的大圆距离D',并和两者实际的大圆距离D进行 比较分析,得出电离层虚高对大圆距离解算的影响. 在整个目标站点的大圆距离的解算中,参考站点和 定位站点使用同一工作频率.





 $\Delta D = D' - D$

误差ΔD

定位站点和目标站

点解算的大圆距离

D



3.2 数据处理

定位站点和目标站

点实际的大圆距离

D

本次试验站点主要分布在我国的中低纬度,北 纬 30°左右,试验时间为 2021 年的春季,三天平均的 Dst 指数为-12.83,具体时间为 3月 12 日至 3月 14 日每天的 7:30 至 21:00.该时段处于太阳活动低年, 且地磁活动较为平静.选取的数据时间间隔为 15 min, 去掉期间的异常数据,三天数据共计 148条,选取的 数据主要集中在白天是因为这个时间段信号信噪比 较大,人工判读群距离时引入的随机误差较小.

首先对于同一个目标站点比如道孚,在同一时 刻选定一个合适的频点,尽可能使得武汉和仙桃站 点接收的道孚信号的信噪比较大,再使用 MATLAB 软件人工判读当前频点对应的 F₂ 层回波群时延.软 件界面示例见图 5,回波图中左下方的是乐山站点的 斜测信号,右上方的是道孚站点的斜测信号.



and Wuhan stations at 15:00 on March 12, 2021

3.3 结果分析

按上述试验方案和数据处理的方法,针对连续 三天的试验观测数据,即可探究电离层虚高不一致 对大圆距离解算的影响.利用道孚-仙桃的虚高解算 道孚-武汉的大圆距离,结果如图 6,相应时刻的频率 见图 7;利用乐山-仙桃解算乐山-武汉的结果见图 8, 频率见图 9.

由图 6、图 8 可知, 两条链路真实的虚高差和大圆距离的解算误差基本在-20~20 km. 虚高差的大小和数据标定时选取的频率有关, 不同的频率计算出的虚高差不同. 虚高差和解算误差绝对值相差不大的原因是, 根据式 (5) 计算出的ΔD和Δh的比例系数在1左右. 道孚-武汉链路早晨和黄昏时虚高差大都为正, 说明晨昏时道孚-仙桃链路的虚高大于道孚-武汉链路, 乐山信号的这一规律不明显.







图 9 乐山-武汉链路数据标定时选取的频率 Fig. 9 Frequency selected for data calibration of Leshan-Wuhan link

三天数据的误差分析结果见表 1 和表 2, 对于道 孚、乐山两个站点来说, 武汉链路的虚高均方根误差 差别较小的原因是道孚-仙桃和道孚-武汉的链路中 点相距 43.3 km, 乐山-仙桃和乐山-武汉的链路中点 相距 43.2 km, 电离层区域不均匀性对二者的影响大 致相同.

由表1可知,利用道孚-仙桃的虚高解算道孚-武 汉的大圆距离,当发射站和接收站相距约1260 km 时,两条路径的虚高均方根误差约为5.82 km,相应 的大圆距离的均方根误差约为5.02 km,相对误差约 为0.34%.当目标站点和接收站点相距更近时(乐山-武汉,约1000 km),其对应的误差分别约为5.5 km, 5.69 km和0.46%.

表 1 道孚-仙桃的虚高解算道孚-武汉大圆距离的误差 Tab. 1 The error using the virtual height of Daofu-Xiantao link to calculate the great circle distance of Daofu-Wuhan link

日期	虚高均方根误差/km	大圆距离均方根误差/km	相对误差/%
3月12日	6.03	5.18	0.34
3月13日	6.35	5.49	0.36
3月14日	5.04	4.35	0.32
平均值	5.82	5.02	0.34

表 2 乐山-仙桃的虚高解算乐山-武汉大圆距离的误差 Tab. 2 The error using the virtual height of Leshan-Xiantao link to calculate the great circle distance of Leshan-Wuhan link

日期	虚高均方根误差/km	大圆距离均方根误差/km	相对误差/%
3月12日	5.46	5.56	0.47
3月13日	4.91	5.22	0.41
3月14日	6.02	6.21	0.48
平均值	5.50	5.69	0.46

道孚站点每天的虚高均方根误差都大于解算均 方根误差,而乐山则相反,主要是因为乐山-武汉链路 的大圆距离与道孚-武汉相比更小.根据前面推导的 误差公式(5)可推出,对于道孚-武汉链路,虚高在 299.6 km以上时,大圆距离解算误差大于虚高差,而 乐山-武汉链路的虚高只要在245.6 km以上大圆距 离解算误差就会大于虚高差,在实际探测中虚高在 245.6 km以上的偏多,就会导致上述情形.道孚-武汉 链路的相对误差较乐山-武汉小,也和乐山-武汉大圆 距离小有关.

在本次试验分析中,发现两条链路(道孚-武汉和 乐山-武汉)的虚高和大圆距离误差没有相关性,这 是因为在实际频点选择中,为了尽量减少误差,本文 选取信噪比较高的频点,就是导致两个链路在群路 径标定时,选取的频点不一致,由此导致两条链路的 相关性不大.另外,关于道孚-武汉和乐山-武汉这两 条链路相干性的分析,刘桐辛等^[17]有详细的分析.

在本文的试验中,试验的链路主要在1200 km 左 右,当目标的大圆距离更远时,例如1500 km 和 2000 km 时,假设实际虚高为200 km,虚高差为 5 km,则根据公式(5),对应的大圆距离解算误差和相 对误差约为3.16 km、0.21%和2.71 km、0.14%,表明 实际虚高和虚高差一定时,大圆距离越大,对应的解 算误差和相对误差就越小.

4 结 论

本文利用武汉大学自主研制的电离层探测系统 WISS,以道孚、乐山为目标站点,仙桃为参考站点, 武汉为定位站点模拟超视距雷达目标定位试验,基 于相邻站点仙桃和武汉站的电离层探测数据,对短 基线天波雷达的多站定位算法中电离层虚高对目标 定位精度的影响进行了分析.结果显示在太阳地磁 活动平静期间,当站点间的纬度接近且大圆距离在 1000 km以上时假设虚高一致造成的大圆距离相对 误差在 0.5% 以内,不过对于高精度定位应用而言, 在该尺度下的站点布局定位时假设虚高一致则过于 理想化.根据试验结果以及理论分析,可以从以下两 个方面提高目标的定位精度以满足未来的高精度定 位场景:

1) 降低不同站点的电离层虚高误差, 使多站联 合定位中的虚高一致性原则更加符合实际情况. 为 了实现这一点, 在考虑雷达探测体制的情况下, 需要 尽可能地使接收站点更加靠近.

2)降低雷达电波在电离层中反射的虚高,以此 减小电离层虚高误差对目标定位误差的影响.本文 的试验结果表明,在较低的电离层反射虚高中,即使 电离层虚高误差较大,也能够得到较小的大圆距离 误差.

在本文工作基础上,未来将考虑从以下方面进 一步研究电离层状态对目标定位精度的影响:

1) 研究存在电离层多模多径效应情况下如 Es 层和 F 层同时存在, 电离层虚高对目标定位精度 的影响;

2) 探究在不同的布站尺度下假设虚高一致引入 的误差分析.目前接收站之间的距离在 90 km 左右, 后期工作考虑更小尺度 (如 50 km, 25 km 等尺度) 布 站情况下的试验分析,以探究超视距目标高精度定 位的可能性.

3) 电离层纬度效应对目标定位精度的影响. 由 于目前发射站和两个接收站所在纬度的变化较小, 两条电波反射点处的电离层情况差异不明显, 使得 最终的解算误差较小, 将来会引入广东珠海站点和 云南普洱站点, 研究电离层虚高在纬度方向的变化 对雷达定位的影响.

参考文献

[1] 宋君. 返回式电离层探测技术应用研究[D]. 湖北: 武汉大学, 2011.

SONG J. Research on applications of backscatter ionospheric sounding techniques[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011. (in Chinese)

 [2] 周万幸. 天波超视距雷达发展综述[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1373-1378.
 ZHOU W X. An overview on development of skywave

over-the-horizon radar[J]. Acta electronica sinica, 2011, 39(6): 1373-1378. (in Chinese)

- [3] CHEN G, ZHAO Z Y, ZHANG Y N. Ionospheric Doppler and echo phase measured by the Wuhan ionospheric oblique backscattering sounding system[J]. Radio science, 2007, 42(4): RS4007.
- [4] 王凡.小型化多模式天波超视距雷达系统研究与实现
 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
 WANG F. Miniaturization and multi-mode sky-wave othr system research and realization[D]. Wuhan: Wuhan Uni-
- [5] 周万幸. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.

versity, 2013. (in Chinese)

- [6] GOODMAN J. HF communications science and technology[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [7] 贺承杰. 天波超视距雷达海面目标定位方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2020, 18(5): 112-116+122.
 HE C J. Surface target location method of sky wave over-the-horizon radar[J]. Radar science and technology, 2020, 18(5): 112-116+122. (in Chinese)
- [8] 贺青, 罗来源, 姚山峰. 短波单站无源定位圆概率误差分析[J]. 电波科学学报, 2015, 30(5): 1017-1024.
 HE Q, LUO L Y, YAO S F. Error analysis of single station passive location in high-frequency based on the circular error probable[J]. Chinese journal of radio science, 2015, 30(5): 1017-1024. (in Chinese)
- [9] 攸阳,钱志刚,李吉宁,等.短波时差定位中电离层参数对 定位影响仿真[J].电波科学学报,2017,32(4):462-466.
 YOU Y, QIAN Z G, LI J N, et al. Simulation on the effect of ionospheric parameters on TDOA location in short wave[J]. Chinese journal of radio science, 2017, 32(4): 462-466. (in Chinese)
- [10] CILLIERS P J, COETZEE P J, OLCKCRS J. Ionospheric mapping for HF communications and HF direction finding[C]// IEEE AFRICON, the 7th AFRICON Conference in Africa, 2004: 145-154.
- [11] SVANTESSON T, WENNSTROM M. High-resolution direction finding using a switched parasitic antenna[C]// Proceedings of the 11th IEEE Signal Processing Workshop on Statistical Signal Processing, 2001: 508-511.
- [12] GULDOGAN M B, ARIKAN O, ARIKAN F. A new technique for direction of arrival estimation for ionospheric multipath channels[J]. Advances in space research, 2009, 44: 653-662.
- [13] 韩彦明. 天波超视距雷达无源信标修正方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
 HAN Y M. Research on passive beacon correcting method of OTH radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] NORMAN R J. Backscatter ionogram inversion[C]// Proceedings of the International Conference on Radar. Australia: IEEE Press, 2003: 368-374.