

王 壮, 王 琦, 程 翥, 等. 对流层散射无源测向中方位向散射特性研究[J]. 电波科学学报, 2015, 30(3): 443-448. doi: 10.13443/j.cjors.2014060902

WANG Zhuang, WANG Qi, CHENG Zhu, et al. Characteristics of azimuth scattering signal in tropospheric passive direction finding system [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(3): 443-448. (in Chinese). doi: 10.13443/j.cjors.2014060902

对流层散射无源测向中方位向散射特性研究

王 壮¹ 王 琦^{1,2} 程 翥¹ 王梦南¹ 张雪婷³

(1. 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 95972 部队, 甘肃 酒泉 735000;

3. 国防科学技术大学信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要 研究了对流层超视距无源测向系统中方位向散射信号的特性, 通过定义对流层散射方位向功率因子, 分析不同参数对因子的影响, 得出了接收信号功率中值与接收天线方位向波束宽度的关系. 重点研究了系统对目标测向存在的测向误差和测向虚像模糊问题, 发现存在与接收天线无关的最小测向误差和最小虚像模糊角, 分析了造成这些问题的原因, 并推导出了最小测向误差和最小虚像模糊角与目标天线和距离等的关系.

关键词 对流层散射; 无源测向; 精度; 虚像模糊; 分集

中图分类号 TN958.97 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2015)03-0443-06

Characteristics of azimuth scattering signal in tropospheric passive direction finding system

WANG Zhuang¹ WANG Qi^{1,2} CHENG Zhu¹ WANG Mengnan¹ ZHANG Xueting³

(1. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China;

2. Group 95972, Jiuquan Gansu 735000, China; 3. College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract The characteristics of azimuth scattering signal in tropospheric passive direction finding system is researched. By defining the power factor of tropospheric scattering azimuth and analyzing the effects that different parameters make on the factors, the relationship between the received signal power median value and receiving antenna azimuth beam width was obtained. Focusing on the orientation precision and orientation fuzzy problems during the measurement of the target, we found it existed the minimum direction finding error and minimum fuzzy angle independent from the antenna, then analyzed the reasons of these problems, and derived to the relationship between the minimum direction finding error or minimum fuzzy angle, and target antenna or distance, etc.

Key words tropospheric scatter; passive detection; precision; fuzzy; diversity

收稿日期: 2014-06-09

资助项目: 国家自然科学基金(11173068, 11303094)

联系人: 王 琦 E-mail: airmeng@139.com

引言

地球大气层最低层为对流层,其中分布着大量的散射体,无线电波通过这些散射体时,会被再次辐射,称为对流层散射^[1],基于微波对流层散射能够实现雷达目标超视距无源探测.相对于传统无源探测,对流层散射无源探测中,由于信号源由点源变成了特大体积(散射体体积)源,这会对测向带来与系统电磁性能无关的其他影响,尤其是测向误差和虚像模糊问题.

对流层散射从20世纪50年代起就应用于通信方面,经过几十年的发展,中国的吕保维、张明高、沙踪、熊皓等在对流层散射理论模型和实验测试方面做了突出的贡献,国际电信联盟无线电通信部(ITU-R)也在国内外研究的基础上提出了如P.452^[2]、P.528^[3]、P.617^[4]、P.1546^[5]等建议,利用这些模型可以很好地分析对流层散射特性.

通信系统中,收发双方是合作式的^[6-7],但无源探测中,目标距离会发生变化,并且会在俯仰方位向扫描,这些都会对无源测向造成影响.在张氏对流层散射模型^[1]基础上,研究了微波对流层散射超视距无源测向系统中的目标散射特性,重点分析了方位向不同尺寸接收天线对接收信号功率中值的影响,计算了最小测向误差角和最小虚像模糊角.

1 对流层散射无源测向中方位向散射信号特性

要研究对流层散射无源测向中方位向散射信号特性,首先分析接收信号功率中值与接收天线参数、距离等因子的关系,建立散射模型.

1.1 对流层散射方位向散射模型

图1为对流层散射模型示意图,在张氏模型^[1]中,接收天线在方位向上的波束宽度和朝向都会影响到接收信号功率中值,有关系式

$$P_r \propto G_{rm} U. \quad (1)$$

式中:

$$U = \sqrt{\frac{2\pi}{m}} \cdot \left(\frac{\Theta_{20}}{C_h} \right) \exp \left\{ -\frac{(\varphi_{10}/\psi'_{h1})^2}{1 + \frac{2}{m} (\Theta_{10}/\psi'_{h1})^2} - \left(\frac{\varphi_{20} - \varphi_{2m}}{B_{h2} \psi_{h2}} \right)^2 \right\}, \quad (2)$$

$$\text{其中, } B_{h2} = \sqrt{1 + \frac{2(\Theta_{20}/\psi'_{h2})^2}{m + 2(\Theta_{10}/\psi'_{h1})^2}}, \psi'_{h1} = \frac{\psi_{h1}}{2\sqrt{\ln 2}},$$

$$\psi'_{h2} = \frac{\psi_{h2}}{2\sqrt{\ln 2}}, s_1 = \frac{d_1}{d_2}, \varphi_{2m} = \frac{2s_1 \varphi_{10}}{2 + m(\varphi_{h1}/\Theta_{10})^2},$$

$$C_h = \sqrt{1 + 2 \frac{[(\Theta_{10}/\psi'_{h1})^2 + (\Theta_{20}/\psi'_{h2})^2]}{m}}$$

对照图1,式(1)中 P_r 为接收信号功率中值, G_{rm} 为接收天线最大增益, d_1 、 d_2 为最低散射点在收发点连线上的垂足到发、收点间的距离, Θ_{10} 、 Θ_{20} 分别为发、收双方视平线与收发点连线间的夹角, φ_{10} 、 φ_{20} 分别为发、收天线主轴方位角,方位角均从大圆平面算起,仰角均从视平线算起, ψ_{h1} 、 ψ_{h2} 分别为发、收天线方位向3 dB波束宽度, m 是与气象气候条件和介质结构有关的参数,一般取 $m = 5$ ^[1].

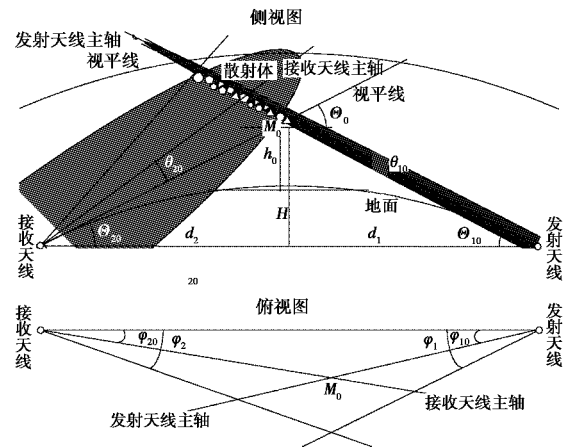


图1 对流层散射模型示意图

定义对流层散射方位向功率因子 β_h 为

$$\beta_h = G_{rm} U. \quad (3)$$

根据天线理论,天线波束越窄,增益越高,天线增益与波束的关系有经验公式^[8]为

$$G = 10 \lg \left[\frac{K}{(\psi_h \psi_v)} \right] \text{ dBi}. \quad (4)$$

式中: K 为与天线形状有关的常数; ψ_h 、 ψ_v 分别为天线方位向、俯仰向3 dB波束宽度.故

$$\beta_h = \frac{K}{\psi_h \psi_v} \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{m}} \cdot \frac{\Theta_{20}}{C_h} \exp \left\{ -\frac{(\varphi_{10}/\psi'_{h1})^2}{1 + \frac{2}{m} (\Theta_{10}/\psi'_{h1})^2} - \left(\frac{\varphi_{20} - \varphi_{2m}}{B_{h2} \psi_{h2}} \right)^2 \right\}. \quad (5)$$

1.2 接收天线方位向波束宽度对接收信号功率的影响

式(5)中当目标天线确定,方位向偏移为0,即 ψ'_{h1} 固定、 $\varphi_{10} = 0$,此时

$$\beta_h = \frac{K}{\psi_h \psi_v} \sqrt{\frac{2\pi}{m}} \cdot \frac{\Theta_{20}}{C_h} \exp\left\{-\left(\frac{\varphi_{20}}{B_{h2} \psi_{h2}}\right)^2\right\}. \quad (6)$$

若此时 $\varphi_{20} = 0$, 方位向功率因子 β_h 最大, 达到 β_{hm} 得

$$\beta_{hm} = \frac{K \sqrt{2\pi/m} \cdot \Theta_{20}}{\psi_{v2} \sqrt{\left[1 + \frac{2}{m} \left(\frac{\Theta_{10}}{\psi_{h1}}\right)^2\right] \psi_{h2}^2 + \frac{8\ln 2 \cdot \Theta_{20}^2}{m}}}. \quad (7)$$

$$\text{令 } Z_h = K \sqrt{\frac{2\pi}{m}} \cdot \frac{\Theta_{20}}{\psi_{v2}}, Y_h = \frac{8\ln 2 \cdot \Theta_{20}^2}{m},$$

$$X_h = 1 + \frac{2}{m} \left(\frac{\Theta_{10}}{\psi_{h1}}\right)^2, \text{ 则}$$

$$\beta_{hm} = \frac{Z_h}{\sqrt{X_h \psi_{h2}^2 + Y_h}}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \beta_{hm}}{\partial \psi_{h2}} = -Z_h X_h \psi_{h2} (X_h \psi_{h2}^2 + Y_h)^{-\frac{3}{2}} \leq 0. \quad (9)$$

因子 β_{hm} 对接收天线方位向 3 dB 波束宽度 ψ_{h2} 的一阶偏导数恒定小于等于 0, 表明, 当发射天线方位向偏移为 0, 收发天线距离确定时, 接收天线方位向最佳接收偏移角为 0, 且随着接收天线方位向波束宽度 ψ_{h2} 变小, β_{hm} 变大, 接收功率中值也变大; $|\partial \beta_{hm} / \partial \psi_{h2}|$ 随着 ψ_{h2} 减小而减小且在 $\psi_{h2} = 0$ 处等于 0, 表明天线方位向宽度小到一定程度之后再变化对接收信号功率中值影响不大。

对于因子 β_{hm} 对 ψ_{h2} 的二阶偏导

$$\frac{\partial^2 \beta_{hm}}{\partial \psi_{h2}^2} = -Z_h X_h [(X_h \psi_{h2}^2 + Y_h)^{-\frac{3}{2}} - 3X_h \psi_{h2}^2 (X_h \psi_{h2}^2 + Y_h)^{-\frac{5}{2}}], \quad (10)$$

存在 $\psi_{h2} = \sqrt{Y_h / 2X_h}$ 使得 $\partial^2 \beta_{hm} / \partial \psi_{h2}^2 = 0$, 且 $\partial^3 \beta_{hm} / \partial \psi_{h2}^3 \neq 0$. 表明方位向功率因子 β_{hm} 随着 ψ_{h2} 的变化存在拐点, 即接收天线方位向波束宽度 $\psi_{h2} = \sqrt{Y_h / 2X_h}$ 时, 接收天线口面方位向增加单位尺寸

引起的接收信号功率中值增量最大, 即接收天线口面效能最高, 如图 2 所示。

当天线尺寸大到一定程度之后, 方位向天线尺寸的增大对接收信号功率中值影响不大, 这个时候将天线在方位向一分为二分集接收, 分集后的天线尺寸应该与拐点处的尺寸相对应, 这样能提高接收信号功率中值, 但会对测向精度造成影响, 实际天线方位向尺寸设计需要平衡成本、接收功率效能、定位精度等多方面因素。

1.3 发射天线方位向波束宽度对测向造成的误差

当目标天线确定, 方位向偏移为 0 时, 即 φ_{h1}' 固定, $\varphi_{10} = 0$, 由式(6)可知, 随着接收天线方位角朝向 φ_{20} 增大, 方位向功率因子 β_h 不断减小, 导致接收信号功率中值不断减小, 当 φ_{20} 增大到使得接收信号功率中值减小到 $\varphi_{20} = 0$ 处 -3 dB 时的方位角范围, 称为接收天线方位向 3 dB 时效波束宽度, 记为 $\Delta\psi_{h2}$ 。

结合高斯函数的特性, 由式(6)可得到

$$\frac{4\ln 2}{\Delta\psi_{h2}^2} = \left(\frac{1}{B_{h2} \psi_{h2}'}\right)^2. \quad (11)$$

即

$$\Delta\psi_{h2} = B_{h2} \psi_{h2}. \quad (12)$$

式中,

$$B_{h2} = \sqrt{1 + \frac{8\ln 2 (\Theta_{20} / \psi_{h2})^2}{m + 8\ln 2 (\Theta_{10} / \psi_{h1})^2}}. \quad (13)$$

定义 B_{h2} 为接收天线方位向波束展宽因子, 其与收发天线距离 D 、发射天线方位向 3 dB 波束宽度 ψ_{h1} 和接收天线方位向 3 dB 波束宽度 ψ_{h2} 有关。

在利用对流层散射对洋面目标侦察中^[9], 洋面可近似看成球体的一部分, 若收发天线架高均在十米量级, 此时 $\Theta_{10} = \Theta_{20} = \Theta_{120}$, 随着距离的增加 Θ_{120} 会增大, 接收天线方位向波束展宽因子 B_{h2} 也会增大, 即距离越远, 接收天线方位向 3 dB 时效波束宽度相对于实际波束展宽的越明显. 这会对侦察系统无源测向带来一定的影响。

将式(13)代入式(12)得

$$\begin{aligned} \Delta\psi_{h2} &= \sqrt{\psi_{h2}^2 + \frac{8\ln 2 \cdot \Theta_{20}^2}{m + 8\ln 2 (\Theta_{10} / \psi_{h1})^2}} \\ &= \sqrt{\psi_{h2}^2 + Y_h / X_h}. \end{aligned} \quad (14)$$

$\Delta\psi_{h2}$ 有极小值 $\sqrt{Y_h / X_h}$, 这表明由于对流层散射的影响, 接收天线朝向的是一个面源, 接收天线方位向 3 dB 时效波束宽度是不会无限限制缩小的。

如图 3 所示, 图中“接收天线波束 0”与发射天线波束完全正对, 由于对流层散射的作用, 接收天线波束 0、波束 1、波束 2 都可能接收到散射信号; 在正

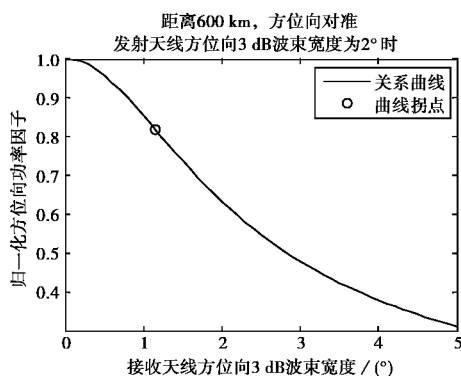


图2 方位向功率因子与接收天线方位向 3 dB 波束宽度的关系图

对的方向 $\Delta\varphi_{h2}$ 的角度邻域内,接收信号功率中值在 3 dB 范围内变化;由于对流层散射过程中天气等其他随机因素的影响,这个范围内并不是严格波束 0 角度接收到的信号功率最大,所以很难精确地测出目标的方向,造成了测向的误差.当接收天线波束宽度不断变窄时,由 3 dB 时效波束宽度引起的测向误差会变小,但测向误差有最小值,为 $\sqrt{Y_h/X_h}$. 最小测向误差达不到 0 是由于散射体源体积特别巨大,当目标确定,在对流层随机分布的情况下,即使采用比幅或者比相的方法,角度误差也不会低于 $\sqrt{Y_h/X_h}$.

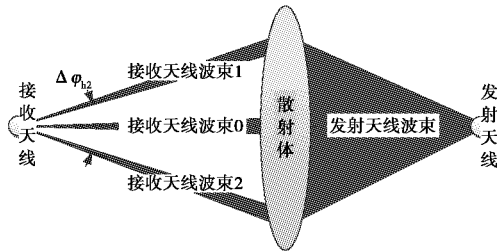


图3 对流层散射无源测向模型俯视图

接收天线架高 10 m,发射天线在洋面上 10 m 时,最小测向误差与距离和发射天线波束宽度的关系如图 4 所示。

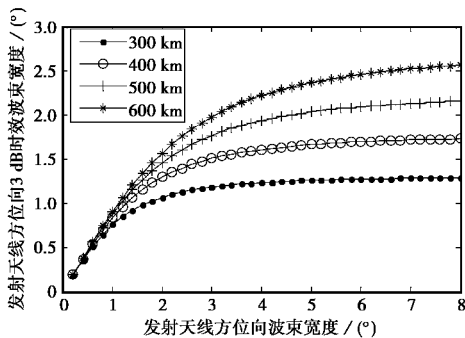


图4 最小角度误差范围与距离和发射天线波束宽度的关系

由图 4 可以看出,随着距离和发射天线方位向波束宽度的不断增大,最小角度误差范围是不断增大的。

1.4 发射天线方位向扫描对测向造成的虚像模糊

实际目标天线在方位向会进行转动等形式的扫描,这样就会出现发射天线方位向偏移的情况,如图 1 和图 5 所示.发射天线每扫描到一个方向,都会有一个接收天线最佳的接收方向,这时候测得的方向

是散射体散射信号强度的“重心”方向。

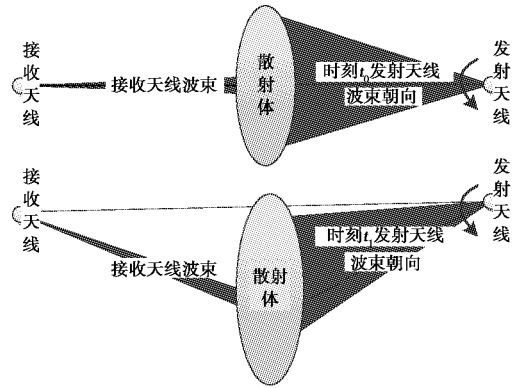


图5 发射天线方位向扫描时的无源测向模型俯视图

由式(5)可得,在 $\varphi_{10} \neq 0$ 的条件下,当 $\varphi_{20} = \varphi_{2m}$ 时,方位向功率因子 β_h 取得最大值,即接收天线方位向的最佳朝向 φ_{mh} 为

$$\varphi_{mh} = \frac{s_1 \varphi_{10}}{1 + \frac{m}{2} \left(\frac{\varphi'_{h1}}{\Theta_{10}} \right)^2}. \quad (15)$$

定义接收天线方位向相对偏移因子 β_φ 为

$$\beta_\varphi = \frac{s_1}{1 + \frac{m}{8 \ln 2} \left(\frac{\varphi_{h1}}{\Theta_{10}} \right)^2}. \quad (16)$$

在利用对流层散射对洋面目标侦察中, $s_1 \approx 1$, $\beta_\varphi < 1$,且随着发射天线方位向 3 dB 波束宽度 φ_{h1} 减小而增大,随着收发天线距离 D 增大也增大.即目标天线方位向 3 dB 波束宽度越窄,距离越远,接收天线的最佳接收方位偏移越接近于发射天线的方位向偏移。

随着目标天线方位向的转动,若接收天线总能处在最佳方位角接收,即 φ_{20} 始终为 φ_{mh} ,此时,式(5)为

$$\beta_h = G_{rm} \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{m}} \cdot \frac{\Theta_{20}}{C_h} \cdot \exp \left\{ - \frac{(\varphi_{10}/\varphi'_{h1})^2}{1 + \frac{2}{m} \left(\frac{\Theta_{10}}{\varphi'_{h1}} \right)^2} \right\}. \quad (17)$$

表明随着目标天线的转动,会存在一个角度范围,使得最坏情况下,接收天线在这个范围内接收到的信号功率中值起伏变化不大,这样会对测向造成虚像模糊。

定义 当目标天线转动时,接收天线始终处于最佳接收方位角,导致的接收信号功率中值大于收发天线主轴共面时接收功率中值的 -3 dB 的发射天线方位角范围为发射天线方位向 3 dB 时效波束宽

度,记为 $\Delta\phi_{h1}$.

由式(17)得

$$\frac{4\ln 2}{\Delta\phi_{h1}^2} = \frac{(1/\phi'_{h1})^2}{1 + \frac{2}{m} \left(\frac{\Theta_{10}}{\phi_{h1}}\right)^2}, \quad (18)$$

即

$$\Delta\phi_{h1} = \sqrt{\phi_{h1}^2 + \frac{8\ln 2 \Theta_{10}^2}{m}}. \quad (19)$$

$\Delta\phi_{h1}$ 与目标天线方位向 3 dB 波束宽度 ϕ_{h1} 、收发天线距离 D 有关. $\Delta\phi_{h1}$ 随着距离 D 的减小而减小、随着 $\Delta\phi_{h1}$ 减小也减小,并且当 ϕ_{h1} 接近于 0 时, $\Delta\phi_{h1}$ 有极小值 $\sqrt{8\ln 2 \Theta_{10}^2 / m}$.

当发射天线转动到 $\Delta\phi_{h1}$ 范围内时,接收天线最佳接收方位角由式(15)确定,会得出一个接收天线方位角范围为 $\Delta\phi_{h12}$,最坏情况下(随着发射天线转动,接收天线方位向朝向总处在其最佳接收方位向上),接收天线方位向在 $\Delta\phi_{h12}$ 范围内接收到的信号功率中值起伏在 3 dB 之内,由于随机影响,系统并不能很好的区分,会造成方位向的测向虚像模糊,称 $\Delta\phi_{h12}$ 为接收天线 3 dB 虚像模糊角,由式(15)可得

$$\Delta\phi_{h12} = \beta_{\varphi} \Delta\phi_{h1}. \quad (20)$$

随着发射天线方位向波束宽度 ϕ_{h1} 不断减小, $\Delta\phi_{h12}$ 存在极小值,最小 3 dB 虚像模糊角 $\min(\Delta\phi_{h12})$ 为

$$\min(\Delta\phi_{h12}) = s_1 \sqrt{8\ln 2 / m} \cdot \Theta_{10}. \quad (21)$$

在利用对流层散射对洋面目标侦察系统中,不考虑天线架高时, $s_1 \approx 1$, Θ_{10} 只与收发天线距离 D 有关,最小模糊角 $\min(\Delta\phi_{h12})$ 也只与收发天线距离 D 有关. 接收天线架高 10 m,发射天线在洋面上 10 m 时,其关系如图 6 所示.

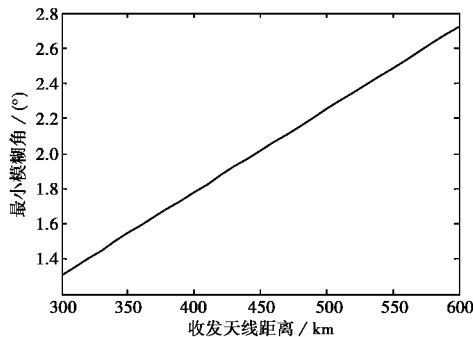


图 6 最小虚像模糊角与收发天线距离的关系

由图 6 可以看出,最小虚像模糊角随着收发天线距离的增加不断增大.

接收信号功率中值与接收天线尺寸直接相关,

并且存在接收功率效能最优尺寸;测向精度和虚像模糊均与收发天线方位向波束宽度和距离直接相关,并且存在与接收系统性能无关的最小测向误差值和最小虚像模糊角.

2 结 论

重点研究了对流层无源测向系统中散射信号方位向的特性,得出接收天线方位向波束宽度变小,接收信号功率中值变大,并且存在效能最优尺寸;接收天线方位向大到一定尺寸后,需要分集;目标雷达确定之后,存在一个与接收系统无关的最小测向误差值;目标雷达在方位向的扫描会对测向侦察造成方位向的虚像模糊等结论. 所有结论均结合实际需求和系统设计指标要求,在成熟的理论基础上,经过严谨的推导计算得出,但下一步还需要进行具体实验验证.

参考文献

- [1] 张明高. 对流层散射传播[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
ZHANG Minggao. Troposphere Scatter Propagation. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. (in Chinese)
- [2] ITU-R. Rec. P. 452-14, Prediction Procedure for the Evaluation of Interference Between Stations on the Surface of the Earth at Frequencies Above About 0.1 GHz[S]. Geneva: International Telecommunication Union, 2009.
- [3] ITU-R. Rec. P. 528-3, Propagation Curves for Aeronautical Mobile and Radio Navigation Services Using the VHF, UHF and SHF Bands[S]. Geneva: International Telecommunication Union, 2012.
- [4] ITU-R. Rec. P. 617-1, Propagation Prediction Techniques and Data Required for the Design of Trans-horizon Radio-relay Systems[S]. Geneva: International Telecommunication Union, 1992.
- [5] ITU-R. Rec. P. 1546-4, Method for Point-to-area Prediction for Terrestrial Services in the Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz[S]. Geneva: International Telecommunication Union, 2009.
- [6] 徐松毅,陈常嘉,李文铎. 高仰角对流层散射电波传播损耗的一种预计方法[J]. 电波科学学报, 2011, 26(3):528-531.
XU Songyi, CHEN Changjia, LI Wenduo. A prediction method of the troposcatter transmission loss with high elevation [J]. Chinese Journal of Radio Science,

2011,26(3):528-531. (in Chinese)

- [7] 张利军,韩 慧,张 蕊,等. 海上超视距传输信号衰落分布分析[J]. 电波科学学报, 2013,28(3):535-539.

ZHANG Lijun, HAN Hui, ZHANG Rui, et al. Fading distribution analysis of trans-horizon signal propagation over the sea-path [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013,28(3):535-539. (in Chinese)

- [8] 秦顺友. 口径天线方向性系数和增益的快速估算方法[J]. 电波科学学报, 2002, 17(2):192-196.

QIN Shunyou. Method of fast estimating aperture antenna directivity and gain [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(2):192-196. (in Chinese)

- [9] 刘爱国,察 毫. 微波超视距雷达对海面舰船目标距离的探测[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2009, 36(4):741-745.

LIU Aiguo, CHA Hao. Study of the microwave OTH radar maximum detection range of ships [J]. Journal of Xidian University, 2009,36(4):741-745. (in Chinese)

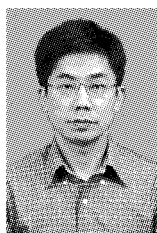


王 琦 (1990—),男,陕西人,国防科技大学硕士研究生,研究方向为雷达信息处理与自动目标识别.



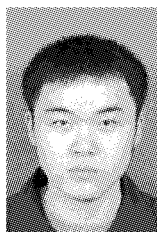
程 翥 (1974—),男,江苏人,副教授,博士,研究方向为信号处理.

作者简介



王 壮 (1973—),男,江苏人,教授,硕士生导师,博士,研究方向为雷达信息处理、空间目标监视、目标识别.

(上接第 428 页)



孙 栋 (1987—),男,江苏人,硕士研究生,主要研究方向为电磁散射、电磁场数值计算等.