

引用格式: 倪东, 刘山, 马超, 等. 多径环境下地面雷达的地形匹配设计 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(3): 333-338.
NI D, LIU S, MA C, et al. Terrain matching design of ground-based radar in multipath environment[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(3): 333-338.



多径环境下地面雷达的地形匹配设计

倪东*, 刘山, 马超, 方宇, 江涛

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要: 地面雷达部署于阵地后, 由于地面多路径反射叠加, 会产生垂直方向波瓣的分裂, 即多径效应。多径效应对低频段地面雷达的探测性能影响显著。该文从多径效应产生的机理出发, 定量分析了其对雷达探测威力与精度的影响。在此基础上, 提出了地面雷达的地形匹配设计, 包括反射点调整法和频率分集法, 通过合理设计, 不仅可以消弭多径效应的影响, 还能增强雷达探测的威力。该方法可以指导地面雷达部署后的阵地优化, 提升雷达的探测性能。

关键词: 地面雷达; 多径效应; 阵地优化; 地形匹配

中图分类号: TN957 文献标志码: A DOI: 10.12178/1001-0548.2024125

Terrain matching design of ground-based radar in multipath environment

NI Dong*, LIU Shan, MA Chao, FANG Yu, and JIANG Tao

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: The antenna pattern of ground-based radars deployed at a specific location will split in the vertical direction due to the multipath effect. Multipath propagation significantly affects the detection performance of ground-based radar in low frequency. In this paper, the theory of multipath propagation effect is discussed, and the effect on radar detection range and accuracy is analyzed quantitatively. On this basis, reflection position adjusting and frequency diversity are designed to eliminate the multipath effect and even promote the detection range. The proposed design offers a certain significance for the site optimization of ground-based radar and detection performance improvement.

Key words: ground-based radar; multipath effect; site optimization; terrain matching

在自由空间中, 电磁波从雷达传播到目标的路径只有一条 (即直射波), 回波信号功率与目标距离的 4 次方成反比。但是雷达部署在具体的阵地后, 往往存在多径效应, 尤其以低频段雷达为著。多径意味着电磁波从雷达传播到目标的路径不止一条, 一般的多径情况有两条路径, 一条是直射路径, 另一条是由地球表面反射的路径。

多径效应改变了自由空间中电磁波所服从的回波信号功率与距离的 4 次方反比定律^[1]。受多径效应影响, 雷达天线波瓣在垂直方向会发生分裂, 在一些仰角上波束增益降低, 在另一些仰角上波束增益增加。由于雷达探测威力与天线波束增益存在正

相关性, 因此相对于自由空间, 多径环境下雷达探测威力在垂直方向发生畸变, 在一些仰角上探测威力缩减, 在一些仰角上探测威力增强。在测量精度方面, 由于目标回波包括直射波和反射波, 因此测角精度收到反射波的干扰进而恶化。多径效应呈现出与自由空间不同的辐射特性, 显著影响雷达探测威力与测量精度。

地面雷达尤其是地面情报雷达, 需要对一定距离范围内、一定仰角范围内的目标进行全方位搜索警戒, 因此对多径效应的影响非常敏感^[2-3]。

针对多径效应, 文献 [4] 对多径效应开展了雷达反射建模。文献 [5] 提出新的目标检测技术用于

收稿日期: 2024-05-23

作者简介: 倪东, 博士, 高级工程师, 主要从事雷达系统设计、信号处理方面的研究。

*通信作者 E-mail: 458615974@qq.com

多径反射下的低空目标检测。文献 [6-7] 考虑了米波雷达的多径效应, 并提出补偿方法用以改善探测性能。目前已有的文献多集中于多径效应的产生机理与影响, 且主要为定性研究, 少见定量研究。部分文献虽提出了抑制多径效应的方法, 但是不具备普适性, 在工程上难以推广使用。

本文从多径效应产生的机理出发, 定量地分析多径效应对雷达探测威力与精度的影响。在此基础上, 提出了地面雷达的地形匹配设计。一是提出了反射点调整设计, 可以削弱多径效应的影响。二是频率分集设计, 通过合理的频点设置, 不但可以消弭多径效应的影响, 甚至能增强雷达探测威力。本文提出的地面雷达的地形匹配设计, 具备普遍适用性, 可以指导雷达部署后的阵地优化, 显著提升雷达的探测性能。

1 多径效应及其影响

1.1 多径效应产生的机理

在大地坐标系中, 多路径传播的几何关系如图 1 所示。垂直面内与仰角 θ 方向的直射波对应的经地球表面的 A 点反射的反射波, 其掠地角为 ψ , 下视角为 θ_r , 反射点对应的地心角为 γ 。反射波与直射波的路程差为 $\delta(\theta)$, 天线中心 O 距地面 (B 点) 的高度为 h_a , 等效地球半径为 a_e 。

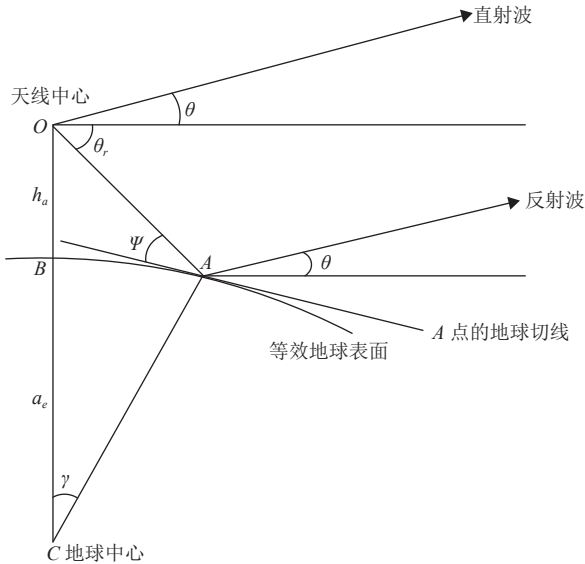


图 1 多路径几何关系

对于低频段地面雷达, 其工作频段多为 S 波段及其以下波段, 天线远场范围为数百米或数公里以外, 所探测的空中目标距离一般为 10 公里至数百公里远, 位于天线远场区域, 以下详细描述多径效应产生的机理。

雷达直射波的场强可表示为:

$$E_d(\theta) = E(\theta) \quad (1)$$

雷达反射波的场强可表示为:

$$E_r(\theta) = \rho E(-\theta_r) \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}\delta(\theta)\right\} \quad (2)$$

因此, 目标处的合成场强为:

$$E_c(\theta) = E_d(\theta) + E_r(\theta) = E(\theta) + \rho E(-\theta_r) \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}\delta(\theta)\right\} \quad (3)$$

将 $E(\theta)$ 归一化为 $\bar{E}(\theta)$, 可得垂直面的方向图传播因子为:

$$F(\theta) = \left| \bar{E}(\theta) + \rho \bar{E}(-\theta_r) \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}\delta(\theta)\right\} \right| \quad (4)$$

式中, ρ 为等效的复反射系数:

$$\rho = D(\theta)\rho_s(\psi)\rho_0(\psi)e^{-j(\phi(\psi)+\beta(-\theta_r)-\beta(\theta))} \quad (5)$$

发散因子 $D(\theta)$ 表征球面对电波反射的影响:

$$D(\theta) = \left\{ \frac{1}{3} \left[1 + \frac{2\sqrt{\frac{a_e}{2h_a}} \tan(\theta)}{\sqrt{\left[\sqrt{\frac{a_e}{2h_a}} \tan(\theta)\right]^2 + 3}} \right] \right\}^{1/2} \quad (6)$$

粗糙度系数 $\rho_s(\psi)$ 表征粗糙表面对电波反射的影响^[8-10], 反射面的粗糙程度以反射面起伏的均方根偏差 σ_h 表示:

$$\rho_s(\psi) = \exp\left[-2\left(\frac{2\pi\sigma_h \sin(\psi)}{\lambda}\right)^2\right] \quad (7)$$

复反射系数的幅度 $\rho_0(\psi)$ 表征光滑平面的反射波幅度:

$$\rho_0(\psi) = \begin{cases} \frac{\left| \frac{\sin(\psi) - \sqrt{\epsilon_c - [\cos(\psi)]^2}}{\sin(\psi) + \sqrt{\epsilon_c - [\cos(\psi)]^2}} \right|}{\left| \frac{\epsilon_c \sin(\psi) - \sqrt{\epsilon_c - [\cos(\psi)]^2}}{\epsilon_c \sin(\psi) + \sqrt{\epsilon_c - [\cos(\psi)]^2}} \right|} & \text{水平极化} \\ \frac{\left| \frac{\sin(\psi) - \sqrt{\epsilon_c - [\cos(\psi)]^2}}{\sin(\psi) + \sqrt{\epsilon_c - [\cos(\psi)]^2}} \right|}{\left| \frac{\epsilon_c \sin(\psi) - \sqrt{\epsilon_c - [\cos(\psi)]^2}}{\epsilon_c \sin(\psi) + \sqrt{\epsilon_c - [\cos(\psi)]^2}} \right|} & \text{垂直极化} \end{cases} \quad (8)$$

复反射系数的相位 $\phi(\psi)$ 表征光滑平面的反射波相位:

$$\phi(\psi) = \begin{cases} \arg\left(\frac{\sin(\psi) - \sqrt{\epsilon_c - [\cos(\psi)]^2}}{\sin(\psi) + \sqrt{\epsilon_c - [\cos(\psi)]^2}}\right) & \text{水平极化} \\ \arg\left(\frac{\epsilon_c \sin(\psi) - \sqrt{\epsilon_c - [\cos(\psi)]^2}}{\epsilon_c \sin(\psi) + \sqrt{\epsilon_c - [\cos(\psi)]^2}}\right) & \text{垂直极化} \end{cases} \quad (9)$$

式中, ε_c 为复介电常数, 它是工作频率 λ 、土壤介电常数 ε_r 和土壤导电率 σ 的函数:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_r - j60\lambda\sigma \quad (10)$$

如果天线的发射和接收方向图不同, 则收发合成后的垂直面方向图传播因子为:

$$F(\theta) = \sqrt{F_T(\theta)F_R(\theta)} \quad (11)$$

$F_T(\theta)$ 和 $F_R(\theta)$ 分别为根据前面计算的发射方向图传播因子和接收方向图传播因子。

垂直面的方向图传播因子, 可以定量地描述多径效应对雷达探测的影响。

1.2 多径效应对雷达探测的影响

当雷达发射的波经两条不同的射线路径到达目标时(见图1), 两条电波所通过的距离不同, 因此, 它们之间有相位差, 并将产生干涉。在反射过程中, 还会产生另外的相移。当直射波与反射波的相位差大于 $\pi/2$ 而小于 $3\pi/2$ 时, 干涉会造成相消, 合成波的幅度小于两个干涉波中的强者; 如果相位差等于 π , 且两个干涉波幅度相等, 则完全相消, 合成波的幅度等于零; 如果相位差的绝对值小于 $\pi/2$, 则干涉造成相加, 合成波的幅度大于任何一个干涉波的幅度; 当相位差等于零时, 合成波的幅度等于干涉波幅度的算术和。

若雷达在自由空间中的探测威力为 R_0 , 则考虑到多径效应的影响, 其实际的探测威力为:

$$R = R_0 F(\theta) \quad (12)$$

由于多径效应的存在, 既能使雷达实际探测威力相比自由空间威力增加, 也能使它减小, 实际探测距离在两个极值之间随仰角作周期性的变化。

举例言之。雷达天线架高 5 m, 俯仰波束宽度 1.5° , 工作频点为 3 000 MHz, 反射面起伏的均方根偏差为 0.2 m。不考虑地面反射时(自由空间), 垂直面的方向图传播因子如图 2 所示。考虑地面反射时, 垂直面的方向图传播因子如图 3 所示。

由图 3 可见, 由于地面反射导致的多径效应, 最低仰角的波束分裂为 3 个波束, 随之增加了 2 个波束凹口。相比于自由空间威力, 多径效应导致雷达在仰角 0.53° 和 1.08° 附近威力明显缩减; 多径效应导致雷达在仰角 0.27° 和 0.80° 附近威力明显增加。这种波瓣分裂会造成雷达对目标探测的不连续, 严重影响雷达性能的发挥。

观察图 2 中较高仰角的波束, 在图 3 中也发生分裂, 不过不甚明显。可知多径效应对低仰角探测

影响甚大; 随着仰角的增大, 其影响逐渐减弱。

以上分析了多径效应对雷达探测威力的影响, 多径效应对雷达探测精度的影响见文献 [11-12]。

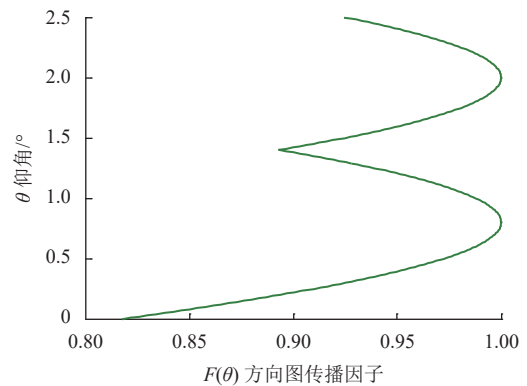


图 2 不考虑地面反射的方向图传播因子

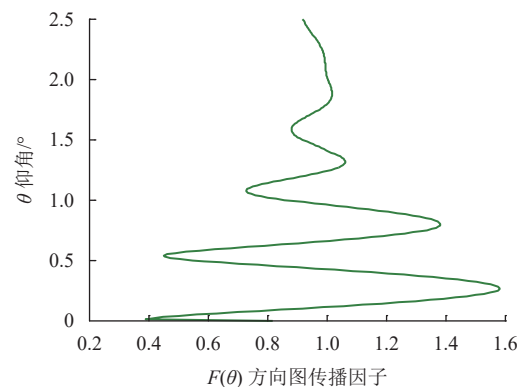


图 3 考虑地面反射的方向图传播因子

2 地形匹配设计

2.1 反射点调整设计

由式 (4)~(6) 可知, 反射点附近地面粗糙度 δ_h , 影响反射波的强度。图 4 给出不同的地面粗糙度 δ_h 与方向图传播因子的关系。由图 4 可见, 反射点附近地面越光滑, 波束分裂的凹口越深, 即多径效应越严重; 反射点附近地面越粗糙, 波束分裂的凹口越浅, 即多径效应越轻微。还可发现, 反射点附近地面粗糙度的变化, 并不改变波束分裂凹口的仰角位置。

图 5 给出了地面反射点位置与不同直射角的关系曲线(工作频率 3 000 MHz, 天线架高 4 m, 地面粗糙度 σ_h)。由图可以发现, 对于 0.1° 以上的直射角, 其对应的反射点位置在 2 000 m 以内(以雷达天线为原点)。低频段地面情报雷达的最低波束指向一般为 $0.5^\circ \sim 2.0^\circ$, 其对应的反射点位置在 100~500 m 之间。

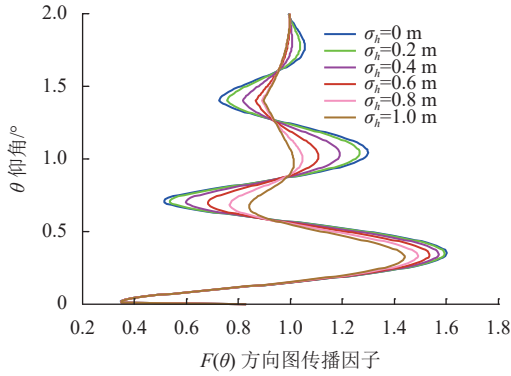


图 4 不同地面粗糙度的方向图传播因子

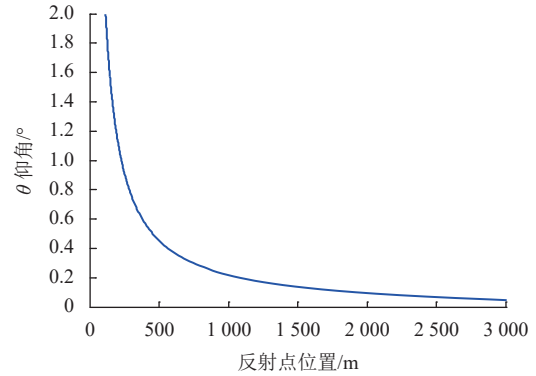


图 5 不同直角对应的地面反射点位置

当雷达架设在具体阵地后,先估算出主要观测方向的地面反射点位置,可通过挖掘或垫高等手段人为改变地面反射点周遭的地形,使其粗糙度(地形起伏)变大,进而减弱多径效应。

$$F(\theta) = |\bar{E}(\theta)| \sqrt{1 + \left(\rho \frac{|\bar{E}(-\theta_r)|}{|\bar{E}(\theta)|} \right)^2} + 2\rho \frac{|\bar{E}(-\theta_r)|}{|\bar{E}(\theta)|} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \delta(\theta) + \phi(\psi) + \beta(-\theta_r) - \beta(\theta) \right) \quad (13)$$

对于低频段地面雷达,天线的垂直波束较宽,且波束最大点指向接近零度仰角, $\beta(-\theta_r) \approx \beta(\theta)$, $|\bar{E}(-\theta_r)| \approx |\bar{E}(\theta)|$ 。针对平坦地面, $\rho \approx 1$, $\phi(\psi) \approx \pi$ 。式(13)可改写为:

$$F(\theta) = 2|\sin(\pi\delta(\theta)/\lambda)| \quad (14)$$

由于目标距离远大于天线高度,故而:

$$\delta(\theta) = 2h_a \sin(\theta) \quad (15)$$

将其带入式(14),得:

$$F(\theta) = 2|\sin(2\pi h_a \sin(\theta)/\lambda)| \quad (16)$$

由式(16)可知,垂直向方向图传播因子随仰角的分布仅取决于天线高度与波长的比值。图6给出了不同工作频率的方向图传播因子(天线架高固定)。由图可见,多径效应导致的波瓣分裂的凹口位置与工作频率呈相关性。随着工作频率的增加,波束分裂的凹口位置仰角减小。

根据式(16),方向图传播因子极小值对应的仰角为:

$$\theta_{\min(n)} = \sin^{-1} \frac{(n-1)\lambda}{2h_a} \quad n = 1, 2, \dots \quad (17)$$

方向图传播因子极大值对应的仰角为:

$$\theta_{\max(n)} = \sin^{-1} \frac{(n-1/2)\lambda}{2h_a} \quad n = 1, 2, \dots \quad (18)$$

当前数字阵雷达资源调度与控制方式极为灵活,大多具备频率分集功能,发射机可将一个信号

2.2 频率分集设计

从式(4)出发,利用欧拉定理将等式右端用三角函数表示:

利用两个具有一定间隔的载频同时辐射出去,接收机同时接收两个频率的信号后合成,然后进行信号处理和数据处理。双频点合成后雷达的方向图传播因子为:

$$F(\theta) = 2|\sin(2\pi h_a \sin(\theta)/\lambda_1)| + 2|\sin(2\pi h_a \sin(\theta)/\lambda_2)| \quad (19)$$

由式(19)可知,天线架高恒定的情况下,通过双频工作并合理设置两个频点的取值,可以改变垂直向方向图传播因子,使其在仰角符合期望的分布特性。

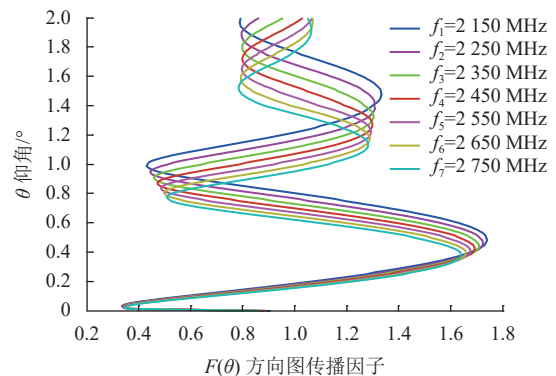


图 6 不同工作频率的方向图传播因子

频率分集工作对于数字阵雷达而言容易实现,不会造成信号处理设备的容量饱和,也不会导致信号损失,不过接收波束的数量也翻倍,在工程实现时仍需关注处理资源的分配,以防影响处理效率。

令低频点方向图传播因子第1极大值与高频点方向图传播因子第2极小值互补, 低频点方向图传播因子第2极小值与高频点方向图传播因子第2极大值互补, 低频点方向图传播因子第2极大值与高频点方向图传播因子第3极小值互补, 依此类推, 这样可以抵消波瓣分裂凹口导致的威力缩减。

$$\text{令 } \sin^{-1} \frac{(2-1)\lambda_1}{2h_a} = \sin^{-1} \frac{(1-1/2)\lambda_2}{2h_a}, \text{ 得 } f_2 = 2f_1.$$

$$\text{令 } \sin^{-1} \frac{(2-1)\lambda_2}{2h_a} = \sin^{-1} \frac{(2-1/2)\lambda_1}{2h_a}, \text{ 得 } f_2 = 1.5f_1.$$

$$\text{令 } \sin^{-1} \frac{(3-1)\lambda_1}{2h_a} = \sin^{-1} \frac{(2-1/2)\lambda_2}{2h_a}, \text{ 得 } f_2 = 1.33f_1.$$

对于较高仰角的波瓣分裂, 其产生的凹口深度愈来愈浅, 对威力的影响越来越小。为了减弱低仰角的多径效应, 双频工作时, 高频点与低频点的关系应设置为 $f_2 = 1.33f_1 \sim 2f_1$ 。

以下举例言之。雷达天线架高4 m, 阵面倾角为 15° , 反射点附近地面粗糙度为0.2 m。雷达频率分集工作(频分双工或双频交替), 较高频点为3 150 MHz, 较低频点为2 150 MHz。

根据式(16), 图7给出了两种不同工作频率的方向图传播因子。通过对高低工作频点大小关系的设置, 可使低频点威力的第1极大值位置大致对应于高频点威力的第2极小值位置, 低频点威力的第2极小值位置大致对应于高频点威力的第2极大值位置, 低频点威力的第2极大值位置大致对应于高频点威力的第3极小值位置。

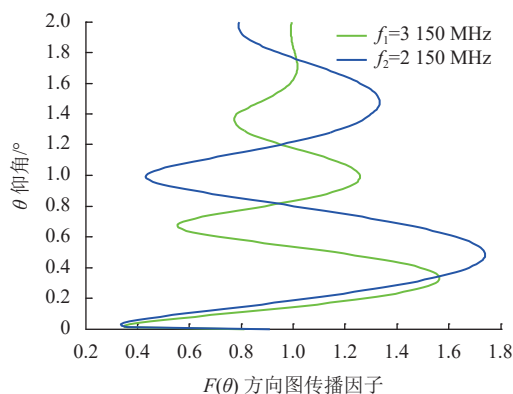


图7 两种不同工作频率的方向图传播因子

通过频率分集, 雷达可双频点工作。根据式(19), 图8给出了双频工作的合成方向图传播因子。由图可见, 通过高低频点大小关系的设置, 雷达双频工作后的合成方向图传播因子基本大于1(仰角 0.15° 以下的盲区是由波束形状决定的, 与多径效应无关)。图8中, 在仰角 0.5° 附近, 方向

图传播因子为1.74, 意味着雷达的威力为自由空间的1.74倍; 在仰角 1° 和 1.5° 附近, 雷达的威力分别为自由空间的1.24倍和1.32倍。

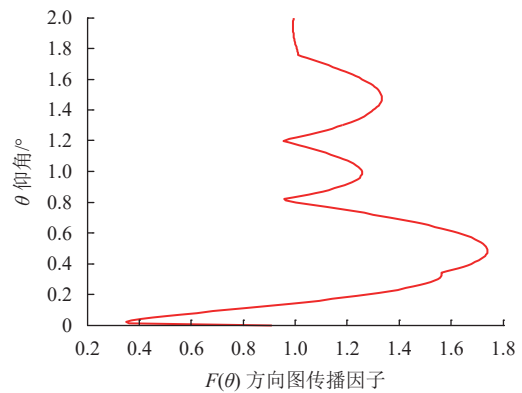


图8 双频工作的合成方向图传播因子

由此可见, 频率分集不但可以弥补多径效应导致威力凹口, 在频点设置得当的情况下, 甚至能增加雷达实际探测威力(相对于自由空间威力)。

3 结束语

本文定量分析了多径效应的产生机理及其对雷达探测的影响。然后提出了地面雷达的两种地形匹配设计方法: 1) 反射点调整法, 人为增大反射点周遭的地面粗糙度, 进而减弱多径效应; 2) 频率分集法, 利用双频点工作消弭多径效应产生的威力凹口, 甚至增强雷达探测威力。仿真结果表明, 提出的方法有效、可行。本文提出的地面雷达的地形匹配设计, 对于雷达部署后的阵地优化具有指导意义, 可提升雷达的探测性能。

参考文献

- [1] BLAKE L V. Radar range-performance analysis[M]. Leighton: Lexington Books, 1980.
- [2] 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.
JIAO P N, ZHANG Z Z. Radar environment and radio wave propagation characteristics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [3] 孙绍国. 多径效应对米波天线方向图影响分析[J]. 电讯技术, 2008, 48(2): 52-56.
SUN S G. Analysis of the influence of multipath effect on meter-wave antenna pattern[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(2): 52-56.
- [4] 杨凡. 多径效应中雷达反射模型的研究[J]. 湖北理工学院学报, 2016, 32(5): 28-32.
YANG F. Research on radar reflection model in multipath effect[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2016,

- 32(5): 28-32.
- [5] 杨世海, 胡卫东, 万建伟, 等. 多径反射下低空目标检测研究[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(4): 492-498.
YANG S H, HU W D, WAN J W, et al. Radar detection of low altitude target in multipath[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2002, 24(4): 492-498.
- [6] 陆鹏程, 江胜利, 同伟. 米波雷达应对多路径效应的系统设计[J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(3): 256-260.
LU P C, JIANG S L, TONG W. VHF radar designing analysis dealing with multipath effect[J]. Radar Science and Technology, 2018, 16(3): 256-260.
- [7] 邱望晟, 丁建江, 许红波, 等. 复杂地形下的米波三坐标雷达多径效应补偿方法研究[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(5): 69-73.
QIU W S, DING J J, XU H B, et al. Research on multipath effect compensation method of meter-wave three-coordinate radar in complex terrain[J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(5): 69-73.
- [8] FUNG A K, LI Z, CHEN K S. Backscattering from a randomly rough dielectric surface[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 356-369.
- [9] SMITH J R Jr, MIROTZNIK M S. Rough surface scattering models[C]//2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. New York: IEEE, 2004: 3107-3110.
- [10] AMENT W S. Toward a theory of reflection by a rough surface[C]//Proceedings of the IRE. New York: IEEE, 1953: 142-146.
- [11] 王阳, 高鹰, 姜宏, 等. 多径效应下 MIMO 雷达的 DOA 估计算法[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(12): 14-17.
WANG Y, GAO Y, JIANG H, et al. Research on DOA estimation algorithm for MIMO radar in multi-path effects[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011, 32(12): 14-17.
- [12] 刘小兵, 魏永辉, 朱方, 等. 改善多径效应对二次雷达测角精度影响研究[J]. 雷达与对抗, 2017, 37(1): 13-16.
LIU X B, WEI Y H, ZHU F, et al. Research on improving multipath effect on angle measurement accuracy of secondary surveillance radar[J]. Radar & ECM, 2017, 37(1): 13-16.

编辑 叶芳