

文章编号: 2095-4980(2013)05-0736-05

多径对雷达探测性能的影响分析

周志增, 刘朋, 顾荣军

(63889部队, 河南孟州 454750)

摘要: 分析了自由空间和多径2种环境下雷达探测概率与信噪比的关系, 雷达探测范围以及不同反射系数和不同载频下的多径传输因子。研究表明, 反射系数越小, 探测概率曲线越接近自由空间下的变化曲线。信噪比较大时, 多径衰落造成其检测性能逐渐下降。当信噪比较低时, 为得到相同的检测概率, 多径所需要的信噪比比自由空间下约小7 dB~8 dB。多径传输因子随着距离起伏较大, 反射因子越大, 多径传输因子起伏越大, 其相应的暴露区裂化程度越严重。

关键词: 多径; 探测范围; 探测概率; 信噪比; 多径传输因子

中图分类号: TN98

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201305.0736

Analysis of radar detection under multipath effect

ZHOU Zhi-zeng, LIU Peng, GU Rong-jun

(63889 Unit of PLA, Mengzhou Henan 454750, China)

Abstract: The relationships between radar detection probability and signal to noise ratio under two environments including free space and the multi-path are analyzed in detail. The radar detection range and the multi-path transmission factors under different reflection coefficients and different carrier frequencies are studied as well. The results show that the smaller the reflection coefficients, the closer the detection probability curves to the curves of the free space; the detection performance declines under high Signal to Noise Ratio(SNR) due to the multipath fading; in order to get the same detection probability, the SNR required in multi-path is lower by 7 dB-8 dB than that in the free space when the SNR is low; the bigger the reflection factors, the bigger the fluctuation of multi-path transmission factors, and the corresponding cracking of exposure zone is more serious.

Key words: multipath; detection range; detection probability; Signal to Noise Ratio; multipath transmission factor

近年来, 相控阵雷达应用越来越广泛, 在电子信息对抗中处于越来越重要的地位。目前电子对抗试验训练中相控阵雷达常用来处理低空目标, 如对无人机的搜索和跟踪。地面的反射作用使接收到的雷达回波信号通常是直接路径与反射路径2种信号的叠加, 结果有可能增强或衰减, 从而严重影响雷达的探测与跟踪性能^[1], 这给雷达进行目标检测和参数估计带来较大影响。据统计, 多径效应能提高检测性能, 但也会造成参数估计精确度降低。为此, 深入研究多径传播特性下的雷达探测性能, 既是雷达对抗效果评估领域的需要, 也是电子对抗试验训练的需要, 同时对于改善雷达系统性能, 降低多径效应和提高雷达系统的测量精确度都具有十分重要的意义。国内外对多径效应的研究主要局限于目标检测^[2-3], 降低测角误差^[4], 建立多径散射模型^[5]和提出最佳检测方法^[6]等。

本文从多径模型出发, 重点研究多径对雷达探测性能的影响, 主要包括2个方面: 多径条件下对雷达探测概率的分析; 多径条件下存在有源干扰时对雷达探测范围的讨论。

1 多径模型

研究多径效应对雷达探测性能的影响, 首先要合理建立多径散射模型, 也就是在雷达波束指向上建立实际地面的垂直剖面模型。依据建立的反射模型, 首先分析哪些区域产生的反射信号能够到达雷达接收天线, 然后结

合反射面的电磁特性及传输路径，计算反射信号的反射强度和相位滞后，最后得到雷达侦察系统天线处的直射波和反射波的合成信号^[7]。

计算多径传输因子，通常考虑4条可能的传输路径：a) 由雷达直接到无人机和由无人机直接到雷达接收机；b) 雷达直接到无人机和从无人机反射的接收路径；c) 发射的反射路径加上无人机到雷达的接收路径；d) 无人机到雷达的反射路径加上其反射的接收路径。典型多径回波模型如图1所示，其中， θ_d 为低空目标的俯仰角， θ_r 为反射信号入射角， ψ 为擦地角， h_t 为无人机的高度， h_a 为雷达天线的高度， R 为雷达到无人机的水平距离， R_d 为雷达到无人机直射射线的距离， R_1 为雷达天线到反射点的距离， R_2 为无人机到反射点的距离。

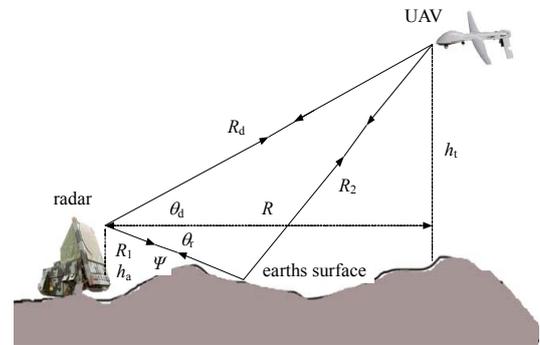


Fig.1 Multipath echo model
图 1 多径回波模型

2 雷达检测概率

雷达在探测低空目标时，如无人机和飞艇，多径效应会导致雷达波瓣分裂，这时接收的回波信号通常是在强杂波背景下直接路径与在波束宽度范围内的反射路径和一条或多条信号的叠加，其强度取决于一个与频率和相对位置有关的函数，这有可能增强或衰减。当相位差大于 $\pi/2$ rad而小于 $3\pi/2$ rad时，干涉会造成相消，合成波的幅度可能小于2个干涉波中的强者；当相位差为 π rad，且2个干涉波幅度相等时，则完全抵消，合成波的幅度等于零；当相位差的绝对值小于 $\pi/2$ rad时，则干涉波相加，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。这种多径传输效应从而给雷达检测、跟踪测角带来一定影响。从统计意义上讲，多径效应对雷达接收信号具有增强效果，有利于雷达对低飞目标的检测^[8]。

雷达回波在多径条件下的幅值为：

$$v = |E| = |E_{\text{直接-直接}} + E_{\text{直接-反射}} + E_{\text{反射-直接}} + E_{\text{反射-反射}}| = |1 + \rho e^{j2\pi\Delta l/\lambda} + \rho e^{j2\pi\Delta l/\lambda} + \rho^2 e^{j2\pi\Delta l/\lambda}| = |(1 + \rho e^{j2\pi\Delta l/\lambda})^2| \quad (1)$$

式中： ρ 为反射系数； Δl 为反射路径与直接路径的差值； λ 为波长。

回波幅度的概率密度函数(Probability Density Function, PDF)为：

$$P(v) = \frac{1}{\pi \sqrt{2(\rho^2 + 1)v - v^2 - (\rho^2 - 1)^2}} \quad (2)$$

图2为回波幅度的PDF。为得到其功率因子，令 $\mu = v^2$ ，其PDF为：

$$P(\mu) = P(v = \mu^{1/2}) \left| \frac{dv}{d\mu} \right| = \frac{1}{2\pi \sqrt{2(\rho^2 + 1)\mu^{3/2} - \mu^2 - (\rho^2 - 1)^2 \mu}} \quad (3)$$

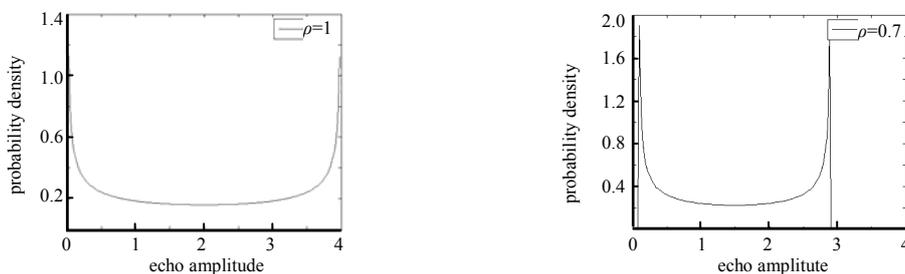


Fig.2 PDF of echo amplitude
图 2 回波幅度的 PDF

假设单脉冲检测时的虚警概率为 p_F ，对于M/N检测，总的虚警概率 P_F 为：

$$P_F = \sum_{k=M}^N \binom{N}{k} p_F^k (1 - p_F)^{N-k} \quad (4)$$

单次检测门限可以通过 $\eta = -\ln p_F$ 求得。

经推导^[9-10]，得到多径环境下的雷达单次检测概率为：

$$P_d = \int_{\eta}^{\infty} p(t|S) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{16} \frac{e^{-\eta/(\mu S+1)}}{\sqrt{4\mu^{3/2} - \mu^2}} d\mu \quad (5)$$

式中： μ 为多径功率因数； S 为信噪比均值。

Matlab仿真过程中，由于公式较复杂，需使用辛普森公式进行数值积分。从对单脉冲和多脉冲在多径和自由空间下的比较结果可以看出，由于多径效应的影响，雷达回波功率会有所增强。图3中，单脉冲下， P_d 取值为0.6左右时，检测所需SNR比自由空间要小，且反射系数 ρ 越小，曲线变化趋势越接近于自由空间下的变化曲线。SNR较大时，由于多径衰落，其检测性能逐渐下降。脉冲个数为6，SNR小于10 dB时，与单脉冲情况相比，多径的检测性能要比自由空间好得多。当SNR较低时，要得到相同的检测概率，多径所需的SNR比自由空间下约小7 dB~8 dB。随着SNR的递增，相比于自由空间，多径下的雷达检测性能逐渐变差。当SNR大于16 dB时，自由空间检测概率超过多径检测概率。

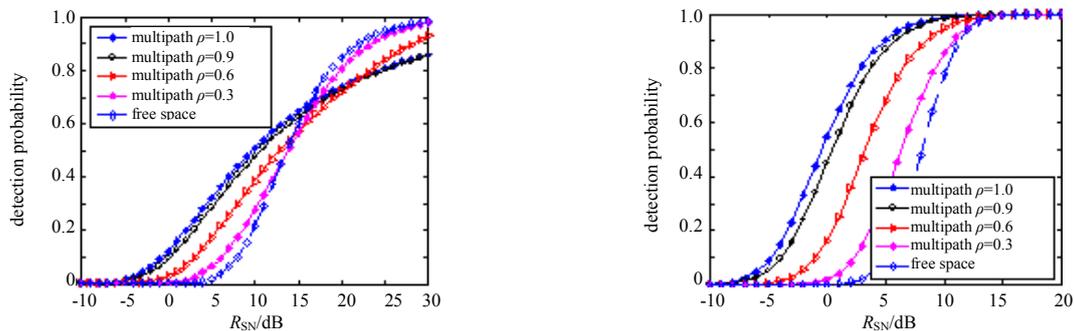


图3 单脉冲和多脉冲在自由空间和多径下的检测概率

3 雷达探测范围

雷达在实际工作中，经常受到外界的干扰，综合考虑外界有源干扰因素和多径影响。仿真中，假设干扰机天线主瓣方向始终对准雷达，同时，不失讨论问题的一般性，为了缩减仿真时间，选择较合适的参数，让无干扰下的雷达最大作用距离较小，这对问题的分析不会有任何影响。假设雷达主瓣方向存在外界有源干扰，具体雷达、干扰和目标参数选择如表1所示^[11-12]。

表1 仿真参数
Table1 Simulation parameters

	transmitting power	process gain/dB	antenna efficiency	receiver noise temperature/K	carrier frequency/GHz	side lobe level/dB	antenna noise temperature/K
radar parameters	30 dBW	20	0.8	800	1	-35	800
jammer parameter	1 W	0					
target information							
	antenna diameter width/m	band width/MHz	back lobe level/dB	elevation length/m	height/m	target cross section/ dBsm	distance from radar/km
radar parameters	2	1	-50	3	5		
jammer parameters		2			120		1.2
target information					500	8	

自由空间下，雷达探测区整体为圆环状，在干扰方向存在凹口。而在多径条件下，雷达探测区域呈现为环带状，主要是由于反射波与直射波的对消引起的(如图4所示)。同时由于直射波和反射波的干涉，造成雷达最大探测距离比自由空间的探测距离要大得多。多径效应不但导致干扰暴露区范围扩大，且出现分裂现象。假定用 R_1 表示自由空间下的雷达探测距离， R_2 表示存在多径效应后的雷达距离。从干涉角度看，当直射路径和反射路径的相位差为 2π rad的整数倍时，干涉的效果是一样的。随着距离变大，雷达掠射角递减，直射波和反射波波长的差值发生变化，或当目标以恒定高度接近雷达时(仰角增加)，探测距离在最大值和最小值之间周期地变化。干涉波瓣最大值处和天线方向图最大值处的探测距离 $R_2=2R_1$ ，干涉波瓣最小值处的探测距离 R_2 为0。方向图传播因子及环形探测区的宽度由多径传播因子决定。

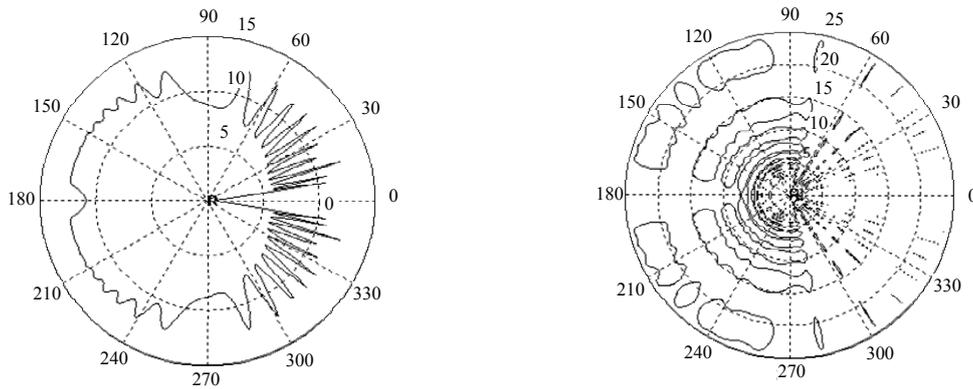


Fig.4 Free space and multipath detection range under interference
图 4 雷达在干扰下的自由空间和多径探测范围

从图5中可以看出，多径传输因子随距离起伏较大。反射因子越大，多径传输因子起伏越大，其相应的暴露区裂化程度越严重。同时，可以看出，多径效应下方向图因子的零点位置与数量和雷达载频的选择有很大关系。显然，多径效应环境对雷达探测造成了巨大影响。因此，在实际对抗训练中，可以考虑借助宽带雷达载频的多样性，如频率分集，来减轻或尽可能地利用多径效应。

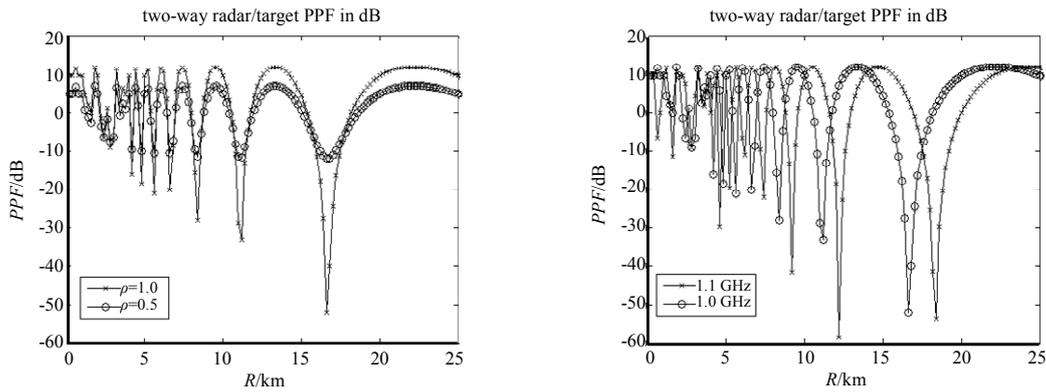


Fig.5 Multipath transmission factor
图 5 多径传输因子

4 结论

本文主要研究多径对雷达探测性能的影响，分别从探测概率和探测距离两方面进行讨论。首先具体分析了自由空间和多径下的探测概率和信噪比的关系，同时考虑外界存在有源干扰下，自由空间和多径下的探测范围以及得到不同反射系数和不同载频下的多径传输因子，给出了具体减轻多径效应的策略。下一步将进行实际的试验验证工作。

参考文献：

[1] 王利军,郭建明,郝晶. 多径效应对雷达探测低空巡航导弹的影响[J]. 雷达科学与技术, 2010,8(1):7-10,14. (WANG Lijun, GUO Jianming, HAO Jing. The Influence of MultiPath Effect on Low Altitude Cruise Missile Detection in Radar[J]. Radar Science and Technology, 2010,8(1):7-10,14.)

[2] WANG Xuezhi, Musicki D. Low elevation sea surface target tracking using IPDA type filters[J]. IEEE Trans. on AES, 2007,43(2):759-774.

[3] 周围,朱联祥,周正中,等. 相干多径环境下信号空间特征及波达方向估计[J]. 电波科学学报, 2007,22(4):685-690. (ZHOU Wei, ZHU Lianxiang, ZHOU Zhengzhong, et al. Estimation of spatial signature and direction of arrivals for signals in coherent multipath environment[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007,22(4):685-690.)

- [4] 张瑜,李玲玲. 多径条件下雷达到达角的估算及仿真[J]. 电波科学学报, 2004,19(2):215-218. (ZHANG Yu,LI Lingling. Radar arrived angle estimation and simulation under multipath condition[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004,19(2):215-218.)
- [5] 李晶,裴亮,曹茂永,等. 一种用于多径环境的超分辨率TOA定位算法[J]. 电波科学学报, 2006,21(5):771-776. (LI Jing, PEI Liang,CAO Maoyong,et al. Superresolution TOA algorithm in multipath environments[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006,21(5):771-776.)
- [6] Barton D K . Low-angle radar tracking[J]. Proceedings of the IEEE, 1974,62(6):687-704.
- [7] 王国玉. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京:国防工业出版社, 2004. (WANG Guoyu. Radar electronic warfare simulation and evaluation system[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2004.)
- [8] 杨勇,王雪松,张文明,等. 多径环境下海面低空目标检测技术研究[J]. 电波科学学报, 2011,26(3):443-448. (YANG Yong,WANG Xuesong,ZHANG Wenming,et al. Research on the target detection technology under the multipath environment of sea surface[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011,26(3):443-448.)
- [9] Wilson S L,Carlson B D. Radar detection in multipath[J]. IEE Proceedings Radar,Sonar and Navigation, 1999,146(1):45-54.
- [10] Mahafza Bassem R. 雷达系统分析与设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2008. (Mahafza Bassem R. Radar Systems Analysis and Design[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008.)
- [11] 周志增,刘洪亮,卢俊道,等. 分布式干扰下的雷达暴露区仿真[J]. 电子对抗, 2010(3):6-10. (ZHOU Zhizeng,LIU Hong liang,LU Jundao,et al. The Simulation of Radars Detection Area Under the Distributed Jamming[J]. Electronic Warfare, 2010(3):6-10.)
- [12] 张顺健,胡振彪,陈永光. 分布式干扰机干扰预警雷达网的暴露区算法[J]. 电子对抗技术, 2003,18(3):8-11. (ZHANG Shunjiang,HU Zhenbiao,CHEN Yongguang. The Calculating Methods of Radar Nets Detection Area on the Condition of Distributed Jammers[J]. Electronic Warfare Technology, 2003,18(3):8-11.)

作者简介:



周志增(1982-),男,安徽省巢湖市人,硕士,主要研究方向为雷达对抗仿真技术.
email:bravezhizeng@sohu.com.

刘朋(1978-),男,河南省南阳市人,硕士,主要研究方向为雷达信号处理和对抗系统的仿真与评估.

顾荣军(1978-),男,江苏省泰州市人,硕士,主要研究方向为电子对抗试验技术的建模与仿真.