

地面探测雷达目标干扰问题的研究

叶春令

(国营 8450 厂, 福建 三明 365001)

摘要: 讨论了主目标距离与干扰目标截面积之间的关系, 结合工程实际应用, 建立了干扰目标与主目标截面积比值, 即主目标距离的数学模型。解决了主目标在不同距离时干扰程度的问题, 并进行了仿真实验与结果分析。

关键词: 地面探测雷达; CFAR; 遮挡; 干扰模型

中图分类号: TN958.3

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)01-0075-02

Study on the targets interfering problems of ground-based radar

Ye Chunling

(State-owned No. 8450 Factory, Sanming 365001, China)

Abstract: The connection between the distance of primary target and the cross-section of interference targets is discussed; to unite practical application of project, the mathematical model of cross-section ratio interference targets and primary target-the distance of primary target is established; the problem of degree of interference when primary target at different distance is resolved, and the experiment is simulated and the result is analysed.

Key words: ground-based radar; CFAR; mask; interference model

噪声与杂波是雷达工作的固有环境, 地面探测雷达要求在复杂的杂波与噪声背景下, 保持恒定的虚警概率完成对动目标的自动检测, 现代动目标检测(MTD)雷达大部分都采用参考单元(距离维)、恒虚警率(CFAR)处理技术来实现^[1-2]。在大多数的应用场合下, 由于 CFAR 在参考单元滑窗统计噪声时不可避免地存在杂波边缘与多目标干扰, 尤其是近距离目标干扰, 从而导致 CFAR 性能严重下降, 甚至主目标被“遮挡”。

目前已经有大量文献^[3-4]对 CFAR 技术在多(大)目标干扰环境下的检测性能进行了分析, 并且得出 CFAR 技术在多目标环境中检测性能变差的结论; 也有文献^[5]对当 CFAR 技术失效时的干扰程度进行了一定的研究, 但该文献^[5]涉及的是一种理想状态, 是基于各参考单元干扰目标的回波幅度一致的基础上进行的讨论, 没有考虑因距离不同而引起的干扰强度的差异, 因此只适用于主目标处于较远距离时刻。

本文就 CA-CFAR 和最小选择 (SO)CFAR 两种经典处理方法, 结合实际工程应用, 对目标干扰模型进行了数学推导与建模。给出了在雷达探测范围内, 主目标被

“遮挡”时干扰目标有效反射面积与距离之间的函数关系式, 并对该数学推导模型进行了仿真验证。

1 CFAR 技术介绍

CFAR 检测器的结构框图如图 1 所示。输入的数据通过相参积累(FIR 或 FFT)处理后, 为了减少系统损失提高多目标的发现概率, 通常对各频道号信号分别做 CFAR 处理, 图 1 描述的就是某一频道号进行滤波的结构框图。为了防止主目标信号泄露, 通常在主目标前后相邻参考单元不参与噪声估计, 图中 Z_1 与 Z_2 分别为主目标的前后 m 个单元的杂波噪声平均值, 函数 $f(Z_1, Z_2)$ 是对 Z_1, Z_2 进行进一步处理 (求平均或选大或选小等),

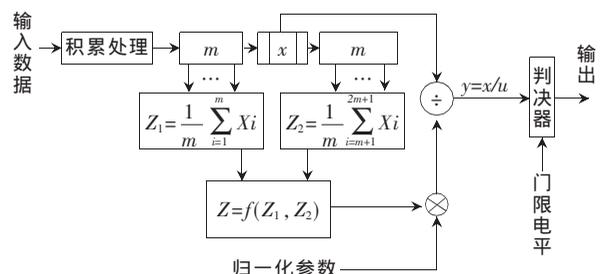


图 1 CFAR 结构框图

技术与方法

Technique and Method

完成杂波噪声估值。

本文将基于 Rayleigh 分布的杂波进行研究,由参考文献[6]可知该分布模型的杂波均值 $L = \sqrt{\pi/2} \sigma$,因而可以得到:

$$\sigma = \sqrt{2/\pi} L \quad (1)$$

利用 σ 值对杂波估值进行归一化处理,主目标信号与归一化噪声的比值通过判决器,并根据给定的门限值完成目标的自动检测。

2 干扰目标 δ_g -距离数学模型的建立

自由空间环境中,假设目标在距离 R 时雷达接收回波的信号功率为 P_r ,则信号与杂波的功率可表示为 $P'_s = P_r + X'$,其中 X' 为杂波功率。单位时间内电磁波的行程 $S = Ct/2$,其中 C 为光速,因此根据雷达方程得到:脉冲雷达第 n 个距离单元内目标信号的回波:

$$P'(n) = \frac{P_t G_r G_t \lambda^2 F_r^2 F_t^2}{(R - 150n\tau)^4 (4\pi)^3} + X_n \quad (2)$$

τ 为距离单元延迟时间,单位 μs ; n 为自然数; X_n 为第 n 个单元内的噪声功率。

通过 CA-CFAR 处理方法进行干扰目标强度模型推导,所有参考单元内信号回波功率估计:

$$P'_s = P'(m) + \dots + P'(1) + P'(-1) + \dots + P'(-m) + X \quad (3)$$

其中 X 表示 $2m$ 参考单元的噪声功率之和, $P'(n)$ 表示第 n 个单元内回波功率。

主目标没被“遮挡”而能被检测时所需满足的条件:

$$P'_s \geq \left(\frac{P'_s}{2m} \right) \times \alpha \times T \quad (4)$$

式(4)中, α 为 Rayleigh 分布杂波的归一化参数, T 为目标判决的门限电平。计算机按照式(4)进行自适应判决,当主目标的回波信号 \geq 参考单元信号平均值与归一化门限的乘积时,认为有目标存在。

令 $D = P_t G_r G_t \lambda^2 F_r^2 F_t^2$, 对于同一部雷达参数 D 都一致,回波大小在自由空间环境中主要与目标有效截面积(σ)和距离相关,由式(2)~式(4)整理后可得目标检测判决方程式:

$$\frac{\delta}{R^4} \geq \left(\frac{\delta_1}{(R - 150 \times 2\tau)^4} + \dots + \frac{\delta_m}{(R - 150(m+1)\tau)^4} + \frac{\delta'_1}{(R + 150 \times 2\tau)^4} + \dots + \frac{\delta'_m}{(R + 150(m+1)\tau)^4} + \frac{X}{D} \right) \times \alpha \times \frac{T}{2m} \quad (5)$$

本文主要讨论主目标被其他大目标“遮挡”的问题,越靠近雷达的目标对主目标干扰程度越严重。所以主目标的前沿参考窗影响更为严重,而且参考单元中第一个参考单元的干扰目标影响最大,特别是在近距离处,雷达回波的信噪比很高,并且常常采用 STC (灵敏度时间控制) 来满足 A/D 采样动态以及收发机的动态要求,这样近距离噪声将非常小。因此为了简化计算以及便于仿真,故选择干扰最严重的情况进行讨论,即假设某相同频道号的干扰目标都集中在最靠近雷达的参考单元内,

并且假设参考单元内的噪声与 D 比值为零,则式(5)可简化为:

$$\frac{\delta}{R^4} \geq \frac{\delta_m}{(R - 150(m+1)\tau)^4} \times \alpha \times \frac{T}{2m} \quad (6)$$

根据参考文献[5],可知对于 $2m$ 个独立同分布的参考单元,可获得满足恒虚警条件时雷达动目标的检测门限 T 如式(7)所示,其中 P_{fas} 为虚警概率。

$$T = 2m (P_{fas}^{\frac{1}{2m}} - 1) \quad (7)$$

由式(1)易知 $\alpha = 2/\pi$,结合式(6)、式(7)可得:

$$\frac{\delta}{R^4} \geq \frac{\delta_m}{(R - 150(m+1)\tau)^4} \times \frac{2}{\pi} \times (P_{fas}^{\frac{1}{2m}} - 1) \quad (8)$$

在实际工程项目中,脉冲雷达一般都存在一定的近距离盲区,而且是与脉冲宽度成比例,其大小为 $150 \times k \times \tau$,其中 k 为自然数,本文假设 $k < m$ (地面探测雷达的近距离盲区要求都比较小)。可得到主目标不被“遮挡”的数学表达式:

$$\begin{cases} \text{无意义} & R \leq 150k\tau \text{ 或 } R > \text{最大作用距离} \\ \frac{\delta}{R^4} \leq \frac{(150(k+1)\tau)^4}{R^4} \times \frac{\pi}{2(P_{fas}^{\frac{1}{2m}} - 1)} & 150k\tau < R \leq 150(m+k+1)\tau \end{cases} \quad (9)$$

当信号处理机采用 SO-CFAR 处理方法时,主目标后沿参考窗口的信号估值更小,并且最靠近主目标的干扰目标影响最大,因此采用上述相同的推导方法可以得到单元平均选小 SO-CFAR 处理方法时,主目标不被“遮挡”应满足的数学表达式:

$$\begin{cases} \text{无意义} & R \leq 150k\tau \text{ 或 } R > \text{最大作用距离} \\ \frac{\delta}{R^4} \leq \frac{(R + 150 \times 2 \times \tau)^4}{R^4} \times \frac{\pi}{4(P_{fas}^{\frac{1}{2m}} - 1)} & 150k\tau < R \leq \text{最大作用距离} \end{cases} \quad (10)$$

3 计算机仿真实验与分析

针对数学模型进行计算机仿真试验及分析,由于该数学模型是基于地面探测雷达工程实现过程推导,因此在仿真试验中对某些参数做如下假设:杂波和噪声的幅度为瑞利分布,雷达动目标检测的虚警概率 $P_{fas} = 10^{-6}$,脉冲宽度为 $0.2 \mu s$,参考单元数 m 依次取值为 8、16 和 32 三种参数,近距离盲区参数 k 取 5。

图 2 所示为基于 CA-CFAR 处理方法的干扰模型, $\Delta\sigma$ 为干扰目标与主目标的截面积比值, R 为主目标所处距离。当主目标在某一距离时,干扰目标比主目标至少大多少时可能“遮挡”主目标。图中目标的干扰情况在近距离表现得更为复杂,刚开始干扰目标要比主目标大很多($m=32$ 时, $\Delta\sigma$ 大约为 20 dB)才可能导致主目标被“遮挡”。随着距离的增加,两者截面积比值 $\Delta\sigma$ 曲线也在不断下降,此时主目标变得很容易被“遮挡”($m=32$ 时, $\Delta\sigma$ 最小将近 -25 dB)。由于该距离段比较短,当距离达到

150(m+k+1) τ 时,干扰程度逐渐减弱,截面积比值 $\Delta\sigma$ 曲线快速上升。图中可以看出,在近距离干扰最严重的距离段,一个小目标就可能致雷达“漏警”。

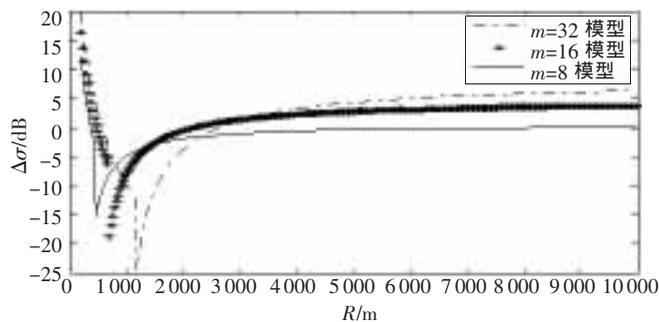


图2 CA-CFAR模型

图3所示为SO-CFAR处理模型时截面积比值 $\Delta\sigma$ 与距离 R 的关系曲线图,从图中可以看出,随着距离增加,曲线呈下降趋势,到几公里后曲线趋于稳定,此时由于距离的差异而产生的的影响不大。

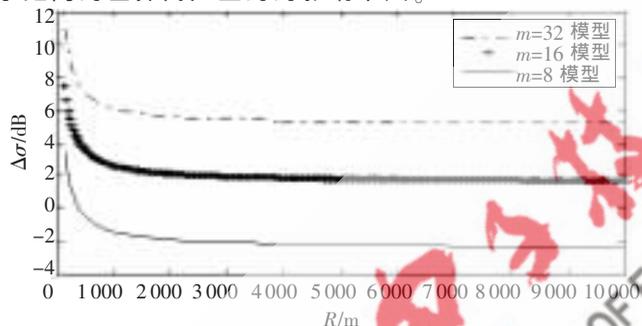


图3 SO-CFAR模型

由图2、图3可以看出SO-CFAR模型比CA-CFAR模型的抗干扰能力更强(特别是近距离),这也与众多的文献^[7]研究结果相同。参考单元较多时,对于噪声功率估计更稳定,而且抗干扰能力较强,但是所涉及的距离越长越可能引入更多的干扰目标,同时参考单元越多所涉及的硬件开销越大。因此在工程应用中要综合考虑参考单元的数目。图2中也容易看出CA-CFAR处理方法,

主目标在2 km以内很容易被干扰目标“遮挡”,由于式(2)中回波功率正比于目标有效截面积($P_r \propto \delta$),因此可参考图2曲线,在原有的STC电路上,精心设计其控制曲线来降低近距离目标被干扰的可能性,提高目标的发现概率。

本文不仅从理论上,更侧重的是从工程实现的角度对问题进行建模、分析,结合CA-CFAR与SO-CFAR处理技术,针对地面探测脉冲雷达进行研究,分析了目标距离与干扰目标之间的关系,并且进行仿真实验及结果分析,对从事雷达总体设计以及信号处理的研究起到一定的借鉴意义,也为雷达整机野外调试实验起到一些指导作用。

参考文献

- [1] 刘敬兴.地面探测脉冲压缩雷达的动目标检测[J].电子技术应用,2010,36(1):132-135.
- [2] 马晓岩,向家彬.雷达信号处理[M].长沙:湖南科学技术出版社,1998.
- [3] MASHADEM B.M-sweeps detection analysis of cell-averaging CFAR processors in multiple-target situations[J]. IEE proc.-F, 1994, 141(2): 103-108.
- [4] HUSSAINI E K, MASHADE M B.Performance of cell-averaging CFAR and order-statistics detectors processing correlated sweeps for multiple interfering targets [J]. Signal Processing, 1996, 49(1):111-118.
- [5] 杜朋飞,张祥军.单元平均恒虚警率检测中的一个新结论[J].现代雷达,2007,29(2):60-62.
- [6] 郭仕剑,王宝顺.MATLAB7.X数字信号处理[M].北京:人民邮电出版社,2006.
- [7] 陈那.信号测试、处理与系统控制分析技术使用全书[M].北京:清华大学出版社,2005.

(收稿日期:2010-06-10)

作者简介:

叶春令,男,1962年生,工程师,主要研究方向:地面雷达系统、光电结合系统总体分析与设计。