

· 通信与信息工程 ·

机载PD雷达杂波功率谱快速重构方法

周 云, 汪学刚

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】分析了机载脉冲多普勒雷达杂波功率谱理论模型, 根据杂波生成机理, 利用距离折叠和多普勒折叠的效应, 提出了一种快速重构多脉冲重复频率下雷达杂波功率谱的方法; 利用一个预先计算的基准杂波功率分布图, 通过距离域和多普勒域的两次级联重构, 完成多重频下杂波功率谱的计算和仿真; 分析了载机与雷达参数对功率谱重构的影响, 减少了运算量, 为功率谱实时计算提供了一种可行方法。

关键词 多重频; 功率谱; 雷达杂波; 重构

中图分类号 TN958.2

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.02.004

Rapid Reconstruct Method of Airborne Pulse Doppler Radar Clutter Power Spectrum

ZHOU Yun and WANG Xue-gang

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The model of airborne pulse Doppler radar clutter power spectrum is analyzed. Based on the mechanism of clutter generation, range and Doppler folder is used to bring out a rapid method for reconstructing the clutter power spectrum, which has multi-pulse repeat frequency. A fiducial clutter power spectrum map is calculated in advance. The real spectrum can be obtained by two cascade reconstruction in range domain and Doppler domain. The effects generated by the change of the parameters of aircraft and radar are analyzed. The method can be used to calculate the real-time clutter power spectrum owing to its computation reduction.

Key words muti-PRF; power spectrum; radar clutter; reconstruction

雷达杂波作为雷达目标检测的重要背景, 对其进行的研究一直是雷达信号处理和雷达回波模拟技术中的重点。雷达应用平台的变化、波段的选择、带宽的扩展、波形的设计使雷达杂波的特性也发生变化。机载雷达由于平台本身的运动造成地物本身与雷达间产生相对运动, 杂波功率谱被展宽, 其主瓣照射的能量将分布在更宽的频带上, 主杂波位置和分布受到雷达指向、飞机速度、工作频率等参数的调制。

雷达杂波本身具有一定的相关性, 在幅度和相位上又具有随机性, 其模拟难点在于要产生既满足特定功率谱分布, 又满足特定幅度分布的随机信号。在幅度分布方面, 主要的杂波统计模型有Rayleigh分布、Log-Normal分布、Weibull分布、复合K分布、广义伽玛分布及广义复合分布等。零记忆非线性变换方法和求不变随机过程法被广泛应用于杂波产

生, 其核心都需要根据雷达的杂波功率谱特性设计相应的滤波器。本文仅就机载雷达杂波功率谱进行研究, 为杂波的产生提供必要的支撑条件。

求解机载雷达杂波功率谱可使用连续波近似Mitchell-Stone法^[1], Helgostam-Ronnerstam模型^[2]。文献[3]导出任意距离多普勒单元中杂波的计算公式, 同时考虑了天线方向图、PRF、脉宽、距离和多普勒模糊以及雷达信号处理过程等因素。文献[4]对文献[3]的方法做了改进, 但其计算需要对距离环——等多普勒线组成的网格区域进行大量的高次数值积分, 计算量很大。文献[5]在平坦地面的假设下导出了用于机载脉冲多普勒雷达计算距离——多普勒单元地物杂波的一组封闭表达式, 避免了数值积分, 减少了计算量。本文通过预先计算一个基准功率谱, 然后根据雷达参数, 经过时频二维折叠加权

收稿日期: 2009-08-18; 修回日期: 2010-04-02

基金项目: 部级预研基金

作者简介: 周 云(1972-), 男, 博士生, 主要从事雷达系统仿真和雷达信号处理方面的研究。

处理, 进一步减少了因参数变化而重新计算杂波功率谱的时间, 特别适合多重频下杂波功率谱的计算。

1 杂波模型

1.1 雷达后向散射系数

杂波后向散射系数可以理解为面积归一化的给定的地面反射率和后向方向性系数的积。发射率表征了既不被地面吸收也不透过地面的那部分入射波照射功率; 后向方向性系数是指沿着到达的入射照射角度方向辐射的那部分反射功率。

国内外大量有关后向散射特性的研究^[6-8]根据各自的测试数据提出了很多散射系数与入射角的关系模型, 比较有代表性的模型为现代雷达理论中普遍应用的常数 γ 模型:

$$\sigma = \gamma \sin \phi \quad (1)$$

式中, γ 是一个与实况参数有关的常数。

修正的地面散射模型为:

$$\sigma(\phi) = \sigma_{od} \sin \phi + \sigma_{os} e^{-(90^\circ - \phi)^2 / \phi_0^2} \quad (2)$$

式中, 等号右边第一项表示低入射角的地形漫反射分量; 第二项表示近似垂直入射角时的镜面反射分量, 构成机载雷达的高度回波; 系数 σ_{od} 和 σ_{os} 是确定性量($\sigma_{od} \ll \sigma_{os}$); ϕ 是擦地角; ϕ_0 是表征镜面反射范围的角度。

中国电波研究所根据10多年多地海面散射特性的研究, 得出具有一定物理意义、且3个散射特性区域统一表示的参数散射模型^[8]为:

$$\sigma = A + B \lg \cos \phi + \exp[-C(\phi - D)] \quad (3)$$

式中, A 表示散射的绝对大小; B 表示散射系数随入射角下降的速度; C 的大小表明准镜面反射特征; D 为准镜面反射区与平直区的分界角。

1.2 地面划分及微小面积杂波反射功率

图1为雷达载机的微小反射面积几何关系图。近

似地认为地面为均匀的平面, 载机在高度 H 以速度 v 平飞, 主波束指向方位角 α 和俯仰角 β , 波束轴向与载机速度矢量间夹角为 ψ , 雷达到微小面积 dA 的距离为 R , 擦地角 $\phi = \beta$ 。

根据雷达方程, 接收到的由微小杂波面积 dA 反射的杂波功率为:

$$dP_r = \frac{P_t \lambda^2 G^2(\psi, Q) \sigma(\psi, Q)}{(4\pi)^3 L(R(\psi, Q))^4} dA \quad (4)$$

式中, P_t 为PD雷达脉冲发射功率; λ 为雷达波长; $G(\psi, Q)$ 为在微小杂波面积方向的天线增益; $R(\psi, Q)$ 为雷达到微小杂波面积 dA 的视距; L 为传播与系统损耗因子; $\sigma(\psi, Q)$ 为地面单位面积对应杂波横截面积。

微小杂波面积的多普勒频率为:

$$f_d = 2v \cos \psi / \lambda \quad (5)$$

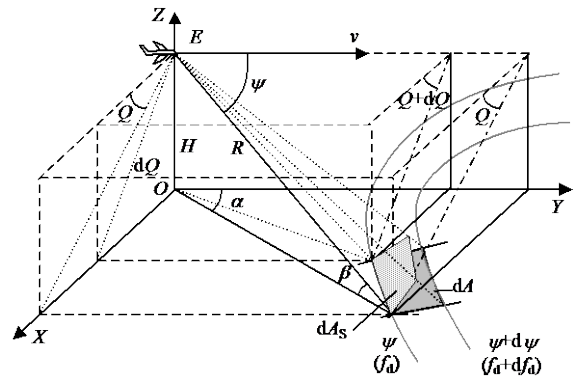


图1 微小反射面积几何关系图

2 重构原理与仿真

2.1 距离折叠效应

假设雷达重复周期为 t_r , 波门 G 位置距离发射脉冲的延时为 t_G , 波门宽度为 T_G , 雷达载机平飞, 高度为 H , 几何示意图如图2所示。

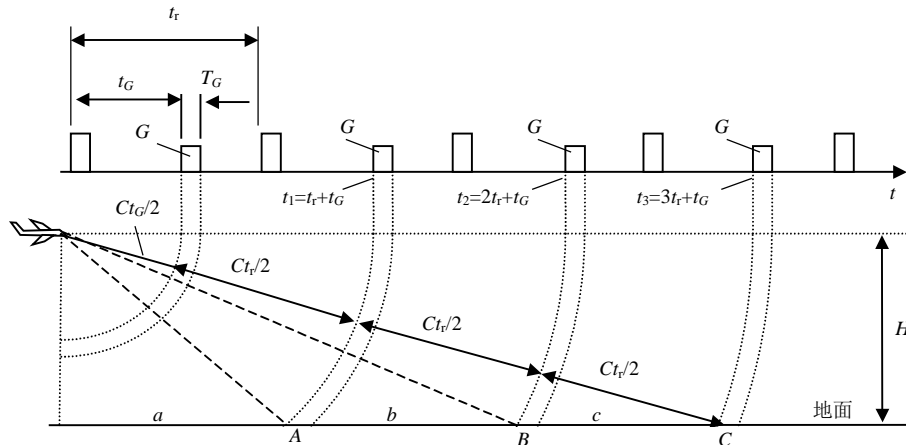


图2 距离模糊示意图

在 $t=0$ 瞬间发射的脉冲在地面 A 、 B 、 C 处反射后,分别经过时延 t_r+t_G 、 $2t_r+t_G$ 、 $3t_r+t_G$ 返回雷达,可以通过同一个波门 G ;而经过地面区域 a 、 b 、 c 处的地面回波将不会落入距离波门 G 中。可以看出:能够进入同一个距离波门的地面反射杂波区是一个个的同心圆环。这些圆环是以雷达为中心,间隔为 $Ct_r/2$ 、厚度为 $Ct_G/2$ 的同心球面与地面相交的部分。对于不同的脉冲重复频率,地面上 A 、 B 、 C 可能处在不同的距离门内,即PRF的改变将引入不同距离环回波的重叠关系,距离门回波能量将重新组合。

通常使用脉冲宽度作为距离门的分段,距离 R 所在的距离门编号为:

$$R_{\text{num}} = \text{int}((R\%R_{\text{nu}})/R_{\text{gate}}) \quad (6)$$

式中, R_{nu} 为选择PRF对应的最大不模糊距离; R_{gate} 为距离门宽度。

2.2 多普勒折叠效应

由雷达信号理论可知,均匀脉冲串信号的频谱成梳齿状,齿的间隔为脉冲重复频率 f_r ,整个频谱的包络由函数 $\text{sinc}(\pi fT)$ 决定。

设脉冲串信号的载频为 f_0 ,则机载PD雷达的地面杂波功率谱是分别以 $f_0 + nf_r$ 为中心、 f_r 为间隔、宽度为 $2f_{\text{dmax}}$ 的若干个形状相似的杂波功率谱的总和, $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。

当 $2f_{\text{dmax}} > f_r$ 时,产生速度模糊现象,引起如图3所示的杂波功率谱交叠。一个PRF内单边交叠的杂波功率谱个数为:

$$N_{\text{uf}} = \text{int}(f_{\text{dmax}}/f_r + 0.5) \quad (7)$$

则机载PD雷达的地面杂波功率谱计算公式为:

$$C(f) = \sum_{n=0}^{\pm N_{\text{uf}}} C_0(f - f_0 + nf_r) \text{sinc}[\pi(f - f_0 + nf_r)T] \quad (8)$$

式中, $C_0(f)$ 为不考虑多普勒模糊时的功率谱。

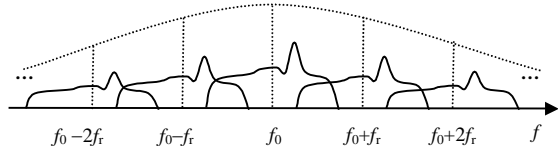


图3 速度模糊(频率模糊)示意图

2.3 重构步骤与仿真

在先不考虑距离模糊和多普勒模糊的前提下,对于地面特定的一个杂波块,结合式(4),如果对 P_i 进行归一化,可以看到其返回的杂波功率取决于 $G(\psi, Q)$ 、 $\sigma(\psi, Q)$ 和 $R(\psi, Q)$,这些能量投射到基准功率谱的坐标为 $(R(\psi, Q), f_d(\psi, v, \lambda))$;重构方法为,

首先根据天线的指向、雷达工作频率、载机的高度、载机速度等,计算基准杂波功率谱,该功率谱与PRF无关;再根据PRF在距离域上进行等距离环的能量叠加;对已经完成等距离环重构的功率谱,在多普勒域上按照PRF与当前最大多普勒的关系进行平移叠加重构。

本文对该重构过程进行仿真。仿真参数为:PRF=16.67 kHz, $\tau=2 \mu\text{s}$, $\alpha=30^\circ$, $\beta=60^\circ$, $v=350 \text{ m/s}$, $h=3000 \text{ m}$, $\lambda=0.03 \text{ m}$ 。

1) 计算功率归一化基准杂波功率谱图,主瓣中心多普勒频移17.5 kHz,旁瓣最大多普勒频移23.33 kHz,如图4所示;

2) 根据PRI参数对不同距离门的功率进行重构,得到距离折叠后的杂波功率谱如图5所示,距离门的个数=60/2=30个,主瓣照射区域斜距 $R=6000 \text{ m}$,位于第20号距离门;

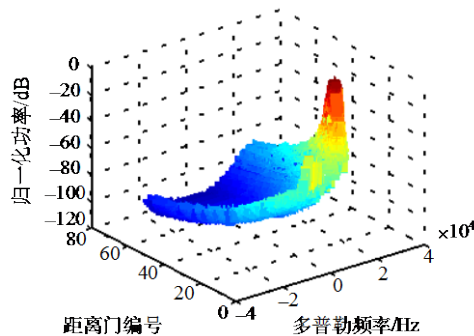


图4 基准功率谱

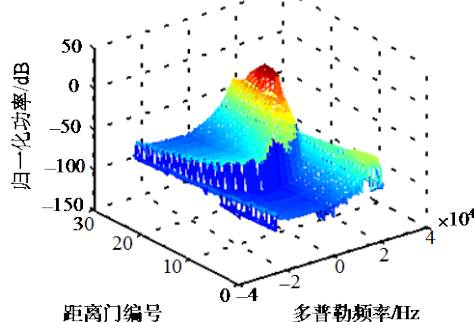


图5 距离折叠后的功率谱

3) 根据当前最大多普勒频移和PRF的关系进行频域上的重构,在 $\pm f_{\text{dmax}}$ 多普勒范围内左右各叠加2次,得到多普勒折叠后的杂波功率谱如图6所示;

4) 截取 $-\text{PRF}/2 \sim +\text{PRF}/2$ 的部分,获得最终的杂波功率谱如图7所示。

对多种重频的杂波谱的构造只要重复步骤2)~步骤4),时间主要消耗在对基准杂波功率谱的计算,步骤2)~步骤3)只是平移加减,步骤4)为截取,所以重构速度快。当前参数下根据距离门宽度对基准杂

波功率的计算地面分块约为 2.5×10^5 个, 每个单元根据式(4)计算并累加到特定的基准功率谱单元, 总的乘加计算量约在 8×10^7 量级, 如果使用DSP芯片TS201, 可在600 MHz的内核时钟下完成48亿/s次乘累加(MAC)运算和36亿/s次浮点运算(FLOP), 计算基准功率谱时间约22.2 ms, 重构需要乘累加运算量不会超过 1×10^6 量级, 计算时间约为0.28 ms。

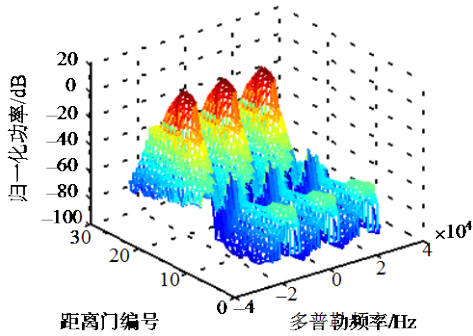


图6 多普勒折叠后的功率谱

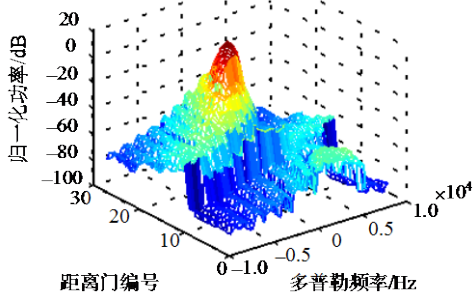


图7 重频内功率谱

3 参数变化对重构的影响

参数变化对重构的影响分析如下。

1) 飞行高度的变化会引起照射面积的增大, 但不会改变杂波能量在多普勒通道上的分布, 会导致斜距的变化, 使得杂波能量在不同的距离门上发生平移, 高度线杂波的位置变化尤为明显。

2) 飞行速度的变化会导致杂波的多普勒频移绝对值的展宽, 最终导致在选取不同PRF时杂波的多普勒域折叠次数有不同, 但对于原始的对最大频移归一化的杂波能量分布图没有影响。所以飞行速度改变只影响最后的频域折叠效应, 不会对距离门折叠造成影响。

3) 雷达方向图的变化使地面的区域性回波强度受到天线方向图调制, 在主瓣内的杂波的增益最高, 但其他方向仍然存在副瓣。方向图的变化使得地面上散布的能量分布发生变化, 但地面上特定点的回波能量回到距离-多普勒平面上的位置不会发

生改变, 即地面区域对应的距离门和多普勒大小不受天线方向图的影响, 仅天线增益 G 发生了变化, 直观地认为雷达的“脚印”发生了变化, 对距离域和多普勒域的折叠不产生影响。图8为其他参数不变, 仅方位角变为 90° 时, 即雷达正侧视模式下的基准功率谱主瓣照射区域集中在零频附近。

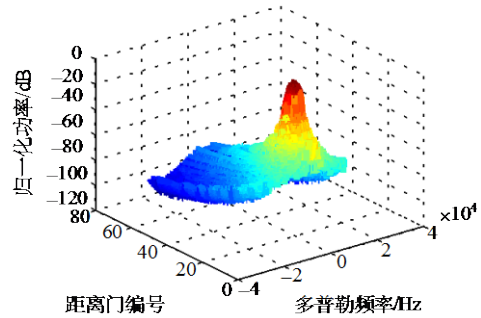
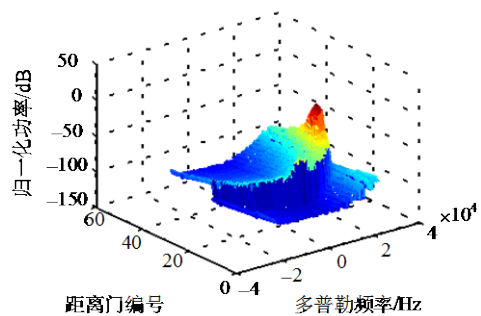
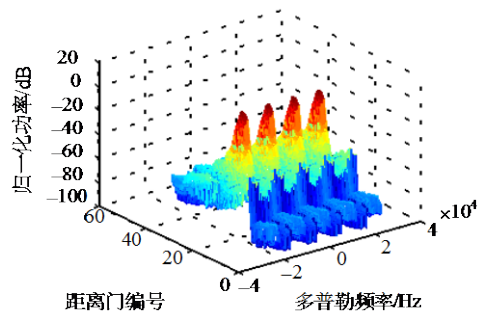


图8 正侧视下基准功率谱

4) PRF变化将引入距离门个数变化, 使得地面等距离环所对应的距离门的编号发生变化, 即不同的距离环的能量将重新组合, 形成不同的距离模糊, 而这些模糊导致地面回波距离环上的求余重组。在多普勒展宽一定的条件下, PRF的变化将带来多普勒域折叠次数变化。设定PRF为11.1 kHz时, 在最大多普勒范围内多普勒折叠后的结果如图9所示。其重构的基础为图4的基准功率谱, 与图5~图7的PRF=16.7 kHz相比较, 可以看到较小的PRF其距离门多, 距离折叠部分减少, 但多普勒折叠次数增加。



a. 距离门折叠后杂波功率谱图



b. 多普勒折叠后杂波功率谱图

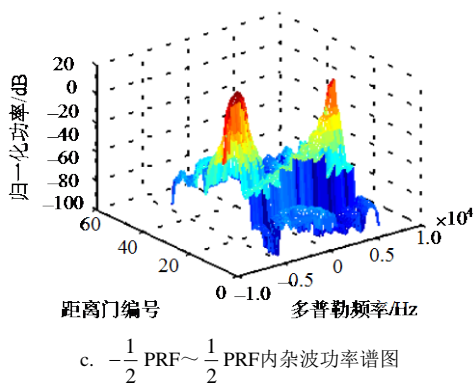


图9 PRF=11.1 kHz下重构各节点杂波谱

4 结论

根据机载脉冲多普勒雷达杂波产生的机理，建立了距离和多普勒域基准功率谱，利用基准功率谱可以快速构建特定指向下的多种PRF的杂波功率谱，特别适用于工作中脉重复频率的多重频模式下的机载雷达，对雷达工作在高脉冲重复频率下，由于最大多普勒频率比重频小，可能出现无杂波区，但是在距离上会高度模糊，低重频则会在频域上高度模糊。雷达指向变化将改变每个杂波块的天线增益，其基准谱需要重新计算。仿真还可利用大容量存储空间预先存储地面杂波块的地形特征、反射特性、天线增益分布等信息，通过查表方式进一步提升仿真的逼真度和运算速度。

参考文献

[1] ZIEGLER J A, ZIEMER R E, BREUGGEMANN R P. A simple comprehensive clutter model for evaluation of pulse doppler radar[C]//Proceeding of National Electronics Conference. [S.l.]: [s.n.], 1973.

- [2] HELGOSTAM L, RONNERSTAM B. Ground clutter caculation for airborne pulse doppler radar[J]. IEEE Trans Military Electronics, 1965, 9(7): 294-297.
- [3] FRIEDLANDER A L. A generalized clutter computation procedure for airborne pulse doppler radars[J]. IEEE Transactions On Aerospace and Electronic System, 1970, AES-6(1): 51-61.
- [4] DIANI M, CROSINI G, CALUGI D. Ground clutter model for airborne MPRF radars in look-down search mode[J]. IEE Proc Radar Sonar Navige, 1976,143(2): 113-120.
- [5] JAO J K, GIGGINST W B. Efficient closed-form computation of airborne pulse-doppler radar clutter[C]// IEEE International Radar Conference. [S.l.]: IEEE, 1985: 17-22.
- [6] KENDRA J R, SARABANDI K. A hybrid experimental/theoretical scattering model for dense random media[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(1): 21-35.
- [7] 汤明, 吉健康, 任康, 等. 植被散射实验数据的特性分析[J].电波科学学报, 1996, (1): 89-95.
TANG ming, JI Jian-kang, REN Kang, et al. An analysis of backscattering characteristics with experimental result for vegetation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1996, 3(1): 89-95.
- [8] MUSICKI D, SUVOROVA S, MORELANDE M, et al. Clutter map and target tracking[C]//2005 8th International Conference on Information Fusion. [S.l.]: [s.n.], 2005.
- [9] ALABASTER C M, HUGHES E J. The design of medium PRF radar schedules for optimum detectability in diverse clutter scenes[J]. Proc IEEE Waveform Diversity & Design, 2006,1: 22-27.
- [10] WILEY D A, PARRY S M, ALABASTER C M, et al. Performance comparison of PRF schedules for medium PRF radar[J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(2): 601-611.

编辑 税红