

一种空频联合处理杂波抑制技术的研究

北京航空航天大学第五研究室 北京

北京航空航天大学 教研室 北京

摘要 本文针对一种距离多普勒域沿迹干涉主瓣杂波抑制技术进行研究 首先指出本文研究方法与传统主瓣杂波抑制技术最大的不同在于前者是空频联合处理 后者是空时联合处理 并给出距离多普勒域沿迹干涉算法的空频二维滤波器形式 其次 本文分析了影响沿迹干涉法杂波抑制能力的固有相位补偿误差和通道匹配误差 并通过仿真分析了固有相位补偿误差和系统参数的关系 第三 本文研究了杂波抑制处理对运动目标回波的影响 运动目标保留程度与系统参数及目标参数的关系 为进一步检测运动目标、估计运动目标参数打下基础

关键词 合成孔径雷达 地面运动目标检测 沿迹干涉 空频联合处理 相位补偿误差

! " #! \$!

本文首先指出本文研究方法与传统主瓣杂波抑制技术最大的不同在于前者是空频联合处理 后者是空时联合处理 并给出距离多普勒域沿迹干涉算法的空频二维滤波器形式 其次 本文分析了影响沿迹干涉法杂波抑制能力的固有相位补偿误差和通道匹配误差 并通过仿真分析了固有相位补偿误差和系统参数的关系 第三 本文研究了杂波抑制处理对运动目标回波的影响 运动目标保留程度与系统参数及目标参数的关系 为进一步检测运动目标、估计运动目标参数打下基础

," ý

是目前 领域的研究热点之一 技术的核心是抑制 主瓣杂波 提取运动目标回波信号 以 体制系统对运动目标检测和成像为目的 技术需要多个天线孔径及处理通道抑制主波束内的杂波 本文将研究一种多个天线相位中心沿航迹方向排列、通过在距离多普勒 域多通道信号干涉处理达到地杂波抑制效果的沿迹干涉 技术 并且比较 与相位中心偏置天线技术 的根本区别 给出描述抑制处理过程的空频二维滤波器形式 分析系统参数对 杂波抑制性能的影响 由于 技术最终目的是检测运动目标并成像 本文还将分析经过杂波抑制处理后运动目标信号的具体形式及其保留幅度与系统参数的关系 为后续运动目标参数估计打下理论基础

如图 所示 前导子天线 和拖尾子天线 方位向回波

分别表示为
其频谱为
则有

$$; 91 \left[< \text{---} \right]$$
$$; 91 \left[< \text{---} \right]$$

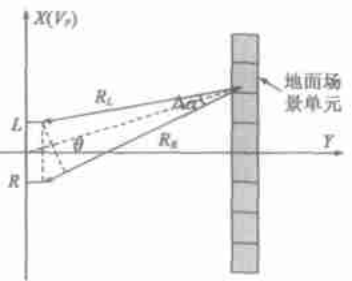


图 1 斜距平面雷达-目标几何关系
分别表示左、右子天线与地面同

一杂波单元间的距离 因为本文所讨论的算法仅利用回波信号的相位信息 所以对公式 中的幅度进行了归一化处理 由于两子天线的相位中心有一定的间距 静止场景同一分辨单元任一时刻到两天线相位中心的距离一般不同 但是由于两个天线相位中心距离较近 这一距离差一般不会大于一个距离向分辨单元的尺寸 在某个方位采样时刻 某杂波

单元相对天线法线角度为 θ 的绝对值小于等于半个天线波束宽度 因为 $\theta < \frac{\theta_{max}}{2}$; $\theta < \frac{\theta_{max}}{2}$ %
 若选 θ_{max} 波段 天线相位中心间距 d ; 3λ , @波束宽度的一半 $\frac{\theta_{max}}{2}$, @ 则 $d \sin \theta < \frac{\lambda}{2}$, @波束边缘处分辨单元在两个通道产生的距离差 $\Delta R < \frac{\lambda}{2}$; $\Delta R < \frac{\lambda}{2}$ 可见距离差一般不大于一个距离门的尺寸 即使两个天线接收信号位于不同的距离单元 根据上述关系也能够解模糊 从而得到同一地面分辨单元在两个天线回波的距离网格上的对应关系 因此在下文的讨论中认为地面同一分辨单元在两个天线的回波位于同一距离门

对两通道回波信号的主要影响是相位差 同一分辨单元同一时刻回波在两通道真实的相位误差

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \sin \theta$$

由此首先想到 如果能够补偿两通道接收信号之间的相位误差 两通道信号相减必然可以抑制回波 但这一工作在时域无法进行 每个采样时刻两天线接收信号是所有照射方向地面场景回波的叠加 而不同方向杂波单元在两通道回波相位差不同 无法一一补偿 如果变换到方位向频域则可能实现相位误差补偿 具体分析如下#由式 $\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \sin \theta$ 可得相位差为#

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \sin \theta$$

为平台速度 当前时刻该单元产生的多普勒频率

$$f_d = \frac{2v \sin \theta}{\lambda}$$

则

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \sin \theta$$

对地面静止场景单元而言 目标回波信号的多普勒频率仅由载机运动产生 由信号的多普勒频率完全可以推得产生此多普勒频率信号的时地面单元相对天线法线的夹角 由单元相对天线法线的角度又可以得到两通道信号在频域的相位差 $\Delta \phi$ 并进行相应的补偿

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \sin \theta$$

对一个通道直接补偿相位差可以达到抑制主瓣杂波的目的 杂波抑制过程为#

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \sin \theta$$

从上文分析可见 方法的实质是将多天线测量的目标空间位置 角度 与多普勒频率联系起来的空频处理方法 技术的空频二维滤波器形式

\$ \dots ; \dots ; < \dots\$

$$\begin{cases} \Delta \phi < \frac{\pi}{2} \\ \Delta \phi < \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

\$ \dots\$ 三维图形

见图 仿真条件#波长

3 天线直径 3 飞

行速度 3 %

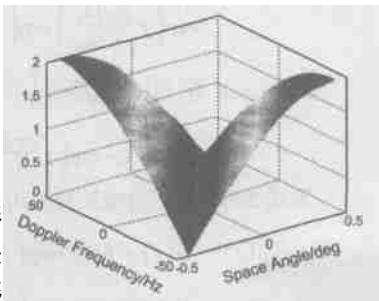


图2 RDAFI技术的空频二维滤波器

与传统的 技术能够 相比 技术能够 放松对载机飞行速度、 天线孔径距离以及采 样率之间关系的严格 要求 使得雷达平台的 飞行更加自由 另外 大量文献中提到的 技术^{AB}其实是

技术的相位检测形 式而已 传统 技术 仍然要求相邻天线相 位中心在相邻采样时 刻经过同样的空间位 置与 的不同仅 在于对两通道的信号 采用共轭相乘、利用干 涉相位区分运动目标 和静止目标 因此均属 于空时联合处理技 术¹ 仿真条件#分 辨率 3 3 作用距 离 3 脉冲宽度 < %其它参数同图 的仿真条件

从图 C 的仿真 结果可见 经过抑制运 动目标保留 杂波被抑 制 从三维图上可以看出 原来包含静止目标的单元抑制后 还有一定的残留量 下一节将分析影响 % & 杂波抑制处理 残留量的因素

$$\bullet Y \ o \ - = \ \yen y \ \acute{I}$$

为了达到较好的杂波抑制效果 减少杂波残留 必须从 两方面考虑#

两通道方向性图和处理过程尽可能匹配 减小通道 失配带来的抑制损失

所补偿相位尽可能接近两通道接收信号真实相位 差 提高杂波抑制程度

第一方面的影响是所有多通道处理系统面临的共性问题 解决的途径主要包括离线蒙特卡洛试验并预先校正 系 统定时的幅相平衡调整等 这里不再赘述

第二方面主要探讨同一场景单元在两通道回波的真实相位 差 $\Delta \phi$ 与实际补偿相位 $\Delta \phi_c$ 之间存在的误差及其对杂波 抑制残留量的影响 在推导近似补偿相位的过程中利用了关系

$$\Delta \phi_c = \frac{\Delta \phi}{\cos \theta}$$

$$\Delta \phi_c = \frac{\Delta \phi}{\cos \theta}$$

从图 的几何关系可见式 是一种近似用 % 近

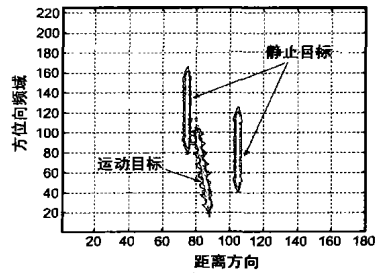


图3 抑制前(距离压缩后)

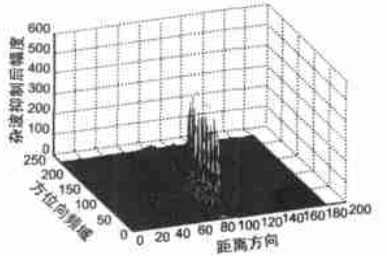


图4 抑制后信号(三维图)

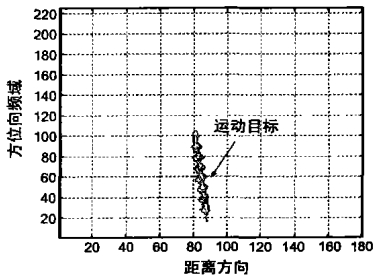


图5 抑制后信号(二维图)

似。并且距离越远 越靠近孔径中心 近似关系的误差越小。式 (1) 虽然不是近似关系 但每个多普勒单元代表了一段频率范围 补偿相位实际上是针对其中心频率设计的 频率子带内其它频率的信号必然存在相位补偿误差 子带划分得越小 以中心频率代表整个子频带的误差也越小。

通过上述分析得到结论#提高作用距离 提高方位向分辨率 有助于提高 系统的杂波抑制水平 提高系统方位向分辨率的途径有二# 提高工作波长 减小天线方位向尺寸 其作用均为增大天线波束张角 θ ; (2)

下面通过仿真证明上述结论

仿真 条件# 波段 7; (3: 天线尺寸); 3 平台速度 3 %点目标 ; 时刻位于载机正侧方向 方位向分辨率 3 不同距离下的杂波抑制效果对比

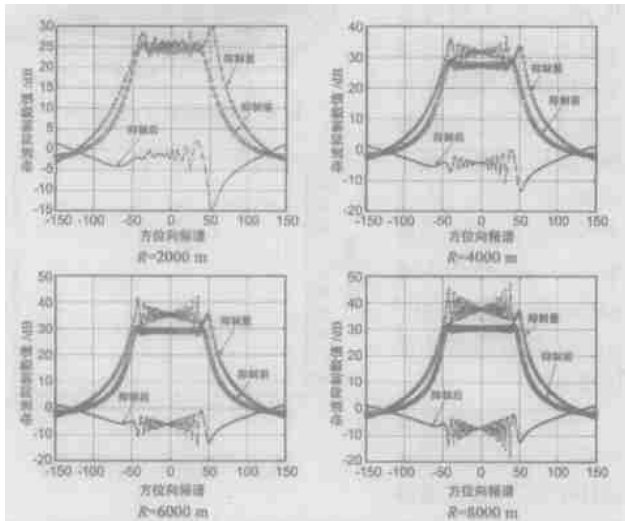


图 6 作用距离对杂波抑制数值的影响

仿真 条件# 7; (3: 天线尺寸); 3 平台速度 3 %作用距离 3 点目标 ; 时刻位于载机正侧方向 方位向分辨率 3 改变载频和天线尺寸

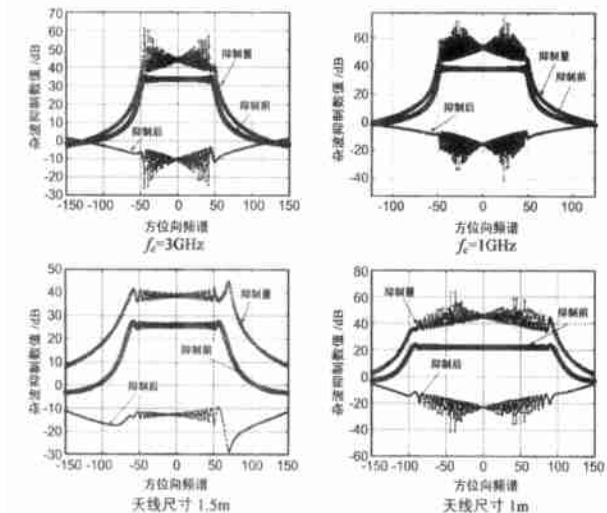


图 7 分辨率对杂波抑制数值的影响

$$o_j \hat{A} \hat{i} " S i o \phi \cdot Y$$

为了获得较大的信(杂噪比 不仅要抑制杂波和噪声 还应尽可能提高抑制后运动目标回波的保留量 运动目标抑制后得以保留的原因在于 运动目标信号与同单元的静止目标信号实际上处于不同的空间几何位置 根据该单元的多普勒频率计算出同单元静止目标信号相对天线的角度 进而得到静止目标回波在两通道的相位差 却不能得到运动目标在两通道的相位差 而且后者与前者一般情况下也不相同 下面定量地分析经过 杂波抑制处理后运动目标的保留程度

假设某包含运动目标信号的距离多普勒分辨单元对应多普勒频率 f_d 根据 f_d 确定的通道间补偿误差为 $\Delta\phi$ (3) 该单元多普勒频率与静止目标角度 θ 的关系为#

$$f_d = \frac{v \sin \theta}{\lambda}$$

多普勒频率与运动目标角度 θ 的关系为#

$$f_d = \frac{v \sin \theta}{\lambda} D$$

运动目标多普勒频率中第一部分由平台运动和目標方位角度确定 第二部分由载机自身径向运动决定 若可知 θ_0

两通道之间运动目标信号的相位差为 $\Delta\phi$; $\frac{\% \cdot \theta}{D}$ 而所补偿的相位与 $\Delta\phi$ 的差别为

$$\Delta\phi - \frac{\% \cdot \theta}{D} < \frac{\% \cdot \theta}{D} < \frac{\% \cdot \theta}{D}$$

对于运动目标回波 两通道接收信号之间关系

$$\begin{aligned} & \cdot ; \cdot 91 < \frac{\% \cdot \theta}{D} \\ & ; \cdot 91 < \left[\frac{\% \cdot \theta}{D} < \frac{\% \cdot \theta}{D} \right] \\ & ; \cdot 91 < \frac{\% \cdot \theta}{D} \end{aligned}$$

处理过程存在两种形式 形式 对抑制后合成信号采用幅度检测方法#

$$\begin{aligned} & ; < 91 \left[\frac{\% \cdot \theta}{D} \right] \\ & ; < 91 < \left[\frac{\% \cdot \theta}{D} \right] \\ & 91 \left[\frac{\% \cdot \theta}{D} \right] 91 \left[\frac{\% \cdot \theta}{D} \right] \\ & ; < 91 \left[\frac{\% \cdot \theta}{D} \right] \\ & ; \left[< 91 \left[\frac{\% \cdot \theta}{D} \right] \right] \end{aligned}$$

形式 对抑制后合成信号采用相位检测方法#

$$\begin{aligned} & ; E 91 \left[\frac{\% \cdot \theta}{D} \right] \\ & ; E 91 < \left[\frac{\% \cdot \theta}{D} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & 91 \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) 91 \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) \\
 & ; E \quad 91 \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) \\
 & ; F \quad F 91 \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

形式 运动目标保留量与相位差及抑制前的信杂比有

$$\left(; \left| \frac{91! \cdot 1 \cdot \left\{ < \cdot 91! \cdot 1 \cdot \right\} 91 \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) 91 \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right)}{91! \cdot 1 \cdot \left\{ < \cdot 91! \cdot 1 \cdot \right\} 91 \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) 91 \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right)} \right| ; \frac{\% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) D \cdot 1 D \text{---}}{\% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) D \cdot 1}$$

考虑到 $91! \cdot 1 \cdot$ 较小的假设#

$$\begin{aligned}
 & \left(; \frac{\% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) D \cdot 1 D \text{---}}{\% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) D \cdot 1} \right) \\
 & ; \frac{\% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) \cdot \% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) D \cdot \% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) \% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right)}{D \cdot 1} \\
 & \frac{\% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right)}{D \cdot 1}
 \end{aligned}$$

代表抑制前一个 分辨单元里运动目标与杂波的幅度比 实际上信杂比为

$$\left(; + \frac{\% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right)}{D \cdot 1} \right)$$

$$\begin{aligned}
 & \text{要求 } (G, \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) ; \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) \frac{\% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) D \cdot 1, (}{+} \\
 & \cdot ; \text{---} / \cdot \% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) \frac{\% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) D \cdot 1, (}{+}
 \end{aligned}$$

上式确定了形式 的最小可检测速度#

$$> ; \frac{\% \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) D \cdot 1, (}{+}$$

形式 运动目标保留量仅受到相位差的影响 最小可检测速度与形式 不同 假设能够有效检测运动目标的必要相位差为 (由此可确定最小可检测速度 $! |3-3$) $.)/4+$

$$> \cdot \&! \$ > \text{---} > \text{---} > ; \text{---}$$

形式 考虑了抑制前信杂比的影响 形式 忽略了该影响 因此杂波抑制前信杂比大的情况适合采用形式 否则应该采用形式

$$/ \text{OE} \ddot{\text{I}} \approx 2 \ddot{\text{u}} \text{ " " }$$

无论哪种形式 的运动目标保留量都受到 91

$\left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right)$ 的影响 --- 越大 越有利于抑制后运动目标的检测

因此得到结论#沿迹干涉法抑制地杂波可以通过增大天线基线长度、减小工作波长、低分辨率工作 增大抑制后的信杂噪比

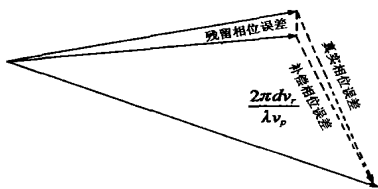


图 8 抑制后杂波与运动目标信号相位关系

关 为了达到系统设定的虚警概率和漏警概率 合成信号信(杂比 (必须达到一定的门限 在已知杂波残留和噪声的情况下可以确定检测运动目标需要的合成信号信杂比 从而确定可检测目标运动速度范围 假设 $91! \cdot 1 \cdot$ "表示左边通道幅度和相位 $91! \cdot 1 \cdot$ "表示两通道幅相误差 $\cdot \cdot$ 表示通道补偿相位误差 杂波抑制后信杂比

(可以认为是 技术中的灵敏度系数 图 直观地表示了真实相位误差、补偿相位误差、残留相位误差三者之间的关系

9 2

本文重点讨论了距离多普勒域采用沿迹干涉法进行杂波抑制的基本原理、杂波残留、运动目标保留等问题 明确指出该方法与传统 方法 的不同在于它放松了对雷达平台飞行的要求 不再要求相邻天线相位中心在相邻的时刻经过同样的空间位置 而是利用空间角度和频率、相位差之间的关系抑制杂波 是一种空频联合处理技术 本文还解析地分析影响杂波残留和因素 得到的结论可作为

系统设计和参数选择的依据 本文的第三部分重点讨论运动目标信号经过两种形式杂波抑制的保留情况 给出两种形式下检测方法和最小可检测速度的表达式 杂波抑制前信杂比大的情况适合采用形式 否则应该采用形式

• I Ó D

$$\begin{aligned}
 & A B H, ! \quad 5/+!) \& \& (\& \% /', +) * ', -., \& /) \& ** \& \% ' \\
 & A B \quad ') * /) \& /+ \& (*'. /, / * A B \\
 & <
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & A B H, ! \quad * (\& 3 /'. 5/+!) \& \& + (\& / \& \& \& ') * (\& 8 \\
 &) * \quad A B \quad ') * /) \& /+ \& (*'. /, / * A B \\
 & <
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & A B \# \& 1 \% \quad = ! 5! 2) \& \quad ? - \& \quad \& 5! 2 / * 2) \quad * (\& 3 /'. (\& \\
 & A B * \& , ! 2) \& \quad A B
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & A B /' \%) \& \% + \& \& ! \cdot \# # , + *) * 7 * /' \cdot \# \& 4 *) ? / ! + \& 9 \\
 & /) * \$) \# \% \& (\& \cdot \# /) \quad ! \% 1 4 -), \quad 1 / . @ \% , /, / * \$ \% \\
 &) 3 A B * \& 4 / . \quad \& (*'. \quad * \& , ! 2) \& A B
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & A B / \$ \& ? , \& ! + * \& \& = / . 6 * 1 / * ' \quad / * \% \quad * (\& 3 /'. \quad ' / - \& \% \\
 & (\& /' ') * (\& 8) \cdot ! / . @ \% , \quad /, / * \$ \% 3 A B \quad ' \\
 &) * /) \& /+ /, / * \& (*'. \quad A B \quad <
 \end{aligned}$$

T ∈ e °

9 Ä 博士 主要研究方向为合成孔径雷达的运动补偿 合成孔径雷达对地面运动目标的参数估计与成像 惯导、雷达组合导航系统及运动补偿 多模式组合导航技术等 3/!+ %' 2B 1J 4-// , - .' ° V \ 教授 博导 主要研究方向为雷达系统设计、合成孔径雷达、信号处理技术、图像处理技术等