

基于数据优先级的雷达目标跟踪 偏差补偿方法

罗 辉

(信息工程大学 密码工程学院, 昆明 650032)

摘要: 传统方法对雷达跟踪目标偏差补偿的精准程度较低, 导致达目标跟踪可靠性及稳定性较差; 为了解决上述问题, 基于数据优先级提出一种雷达目标跟踪偏差补偿方法, 利用雷达极化测量目标信号建立三维空间坐标, 通过对相位控制偏差的校准操作实现数据目标的精准测量; 根据数据优先级原则, 对极化脉冲进行角度测量, 选取适宜测量方案, 设置雷达目标方向图, 实现雷达目标超分辨成像, 去除噪声及模型误差造成的雷达目标跟踪图像的偏差量, 实现雷达目标跟踪偏差补偿; 实验结果表明, 基于数据优先级的雷达目标跟踪偏差补偿方法能够精准补偿雷达跟踪目标的偏差量, 实现雷达目标精准跟踪。

关键词: 数据优先级; 雷达目标; 雷达目标跟踪; 目标跟踪偏差补偿

Deviation Compensation Method of Radar Target Tracking Based on Data Priority

Luo Hui

(College of Cryptography Engineering, Information Engineering University, Kunming 650032, China)

Abstract: The accuracy of the traditional method for compensating for radar tracking target deviation is low, resulting in poor target tracking reliability and stability. In order to solve the above problems, a radar target tracking deviation compensation method is proposed based on the data priority. The radar polarization measurement target signal is used to establish three-dimensional space coordinates. The accurate measurement of the data target is achieved through the calibration operation of the phase control deviation; In principle, measure the angle of the polarized pulse, select a suitable measurement scheme, set the radar target pattern, realize the radar target super-resolution imaging, remove the deviation of the radar target tracking image caused by noise and model errors, and realize the radar target tracking deviation compensation. The experimental results show that the radar target tracking deviation compensation method based on data priority can accurately compensate the deviation of the radar tracking target, and realize the accurate tracking of the radar target.

Keywords: data priority; radar target; radar target tracking; target tracking deviation compensation

0 引言

随着雷达技术的不断发展, 在越来越多的领域中都应用了一定程度的雷达技术, 雷达的目标跟踪是雷达技术中的一个重要组成成分, 这项技术的成熟程度决定着雷达对目标的跟踪精确度, 具有精确度的雷达目标跟踪、直交流控制、模拟项数字控制成为了未来雷达目标跟踪的发展趋势, 本文便主要针对雷达目标的跟踪精确度偏差补偿问题进行研究^[1]。

雷达的追踪目标一般处于海、陆、空三个环境中, 当雷达对目标进行追踪时, 雷达发射的波束直接扫描到目标上, 此时对目标进行定位需要考虑两种情况对雷达目标的跟踪精确度造成的影响, 陆地与海洋中会出现干扰雷达波束的杂质, 使雷达获取的目标测量位置数据受到影响; 而对空中的目标进行跟踪时会出现多径效应, 增强雷波束的

信噪比周期, 这种情况的出现很难应用常规的区域信号处理手段解决, 因此空中目标的多径效应的产生会影响雷达对目标追踪的精确度。雷达追踪目标的精确度随着波束扫描角度的改变而改变, 这一本质特征也是造成雷达追踪目标产生误差的重要原因之一^[2]。

为了提高雷达对目标的追踪准确度, 对雷达目标追踪偏差进行补偿, 本文将基于数据优先级提出雷达目标跟踪偏差补偿方法。本文提出的方法基于数据优先级处理, 主要解决雷达对目标的精准测量偏差补偿, 并应用雷达单相脉冲、极化相位控制等技术^[3]。

1 基于数据优先级的雷达目标跟踪偏差测量与校准

1.1 雷达极化测量目标信号

雷达对极化目标的测量是在三维空间中的坐标系下进行的, 雷达观测坐标系需要与目标的坐标系相同, 在两坐标系之间建立完整的雷达波束航道, 如果目标的信号姿态已经知道, 则可以通过坐标转化的形式将雷达位置固定在

收稿日期: 2020-02-26; 修回日期: 2020-04-13。

作者简介: 罗 辉(1981-), 男, 四川富顺人, 硕士, 副教授, 主要从事信息安全方向的研究。

三维空间坐标系中。雷达极化测量目标信号时采用的发射器在三维空间坐标系中，实时地对目标所放出的电磁波进行检测，从而能够达到雷达对目标信号的实时测量要求^[4]。

为了提高雷达对目标信号测量的精准度，本文将采用极化散射的方式对目标信号进行测量。建立如图 1 所示的三维空间坐标系。

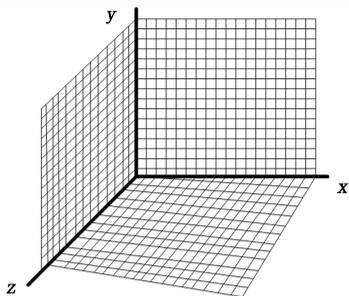


图 1 三维空间坐标系模型图

在坐标系中给信号的波形制定一套参数，当目标在运动的情况下分为两种情况对目标信号进行测量，一种情况是忽略目标运动的距离弯曲程度，确定目标参数包络处于对齐的状态，考虑多普勒定律完成运动参数在坐标系中的参数积累，补偿雷达相位中时间二次项的参数运算；另一种情况是考虑到目标运动的距离弯曲程度，将雷达坐标系中的参数与目标信号的坐标系位置参数进行精准匹配，完成匹配后，应用匹配数据对目标的运动弯曲距离进行校正并保证包络对齐，考虑多普勒参数定律完成雷达相位中的时间二次项运算，保证目标信号参数累积^[5]。运动状况下目标先后测量的处理程序如图 2 所示。

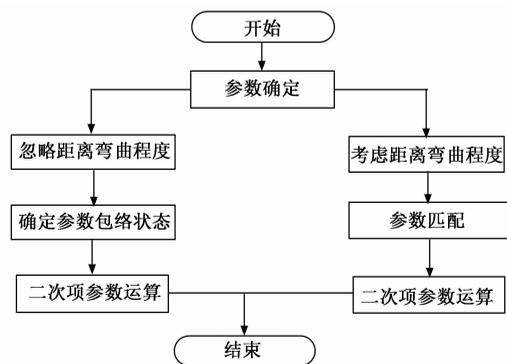


图 2 运动状况下目标先后测量的处理程序框图

通常情况下，在雷达中应用滤波器对目标的回波信号进行滤波匹配，目标在一定的运动范围内小于雷达到目标距离的分辨率，雷达对目标信号检测可以忽略由于滤波器失配而造成的影响，可以应用线性补偿的方式实时检测目标信号进行雷达的极化测量，由于多普勒定律具有扩展的可能性，容易对线性补偿方法下的目标运动时间二次项运算产生影响，不利于雷达对目标信号参数累积，因此，

需要通过滤波器来对雷达脉冲波形进行控制^[6]。

在实际的雷达目标信号检测中，目标的速度常常是未知的，因此目标信号相关参数不能准确地认定，本文便以一定的时间间隔对目标信号进行搜索，将搜索到的信号值与波形信号进行对比匹配，若两组数据匹配成功则说明雷达对速度未知情况下的目标信号参数测量较为准确，能够进一步地对目标速度进行估测。

1.2 相位控制偏差校准

雷达对于目标的位置测量由于受到多方面的因素影响，会出现一定程度的偏差，本文将应用相位控制方法对测量出来的数据偏差进行校准。首先测出雷达距离目标之间相位步长，筛选出相位步长在一个单位范围内的距离条件，对目标的回波信号进行部署校正，要求不同步长的目标回波距离采用不同的补偿方式^[7]。

根据相位距离不同对雷达所测得的回波信号进行校准，若雷达距离目标的相位偏差较大，本文将采用速度相位校准的方法，并最终对校准结果作为参数的积累，速度校准后相位的参数积累被回波包络聚集到一个单元格里，限制相位的距离运动和多普勒定律扩展通道。若雷达距离目标的相位偏差较小，本文将对目标的加速度进行相位距离估算校准，首先本文将测出多普勒定律的扩展频率，通过目标加速度与速度之间的联系计算出三维坐标系中每个单元格所蕴含的能量，获取能量最大的单元格中多普勒定律扩展频率值，在对多普勒定律频率进行搜索预测时，将所有的目标加速度以及回波信号进行初步校准，将初步校准的结果图与多普勒三维图相结合表现出来如图 3 所示。

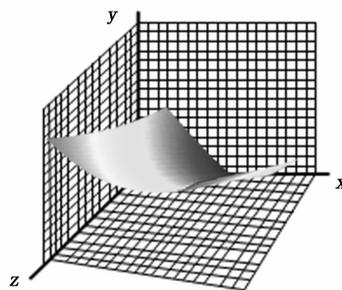


图 3 初步校准结果与多普勒三维结合图

为了提高对雷达目标跟踪偏差补偿方法的准确性，本文还通过增加雷达的相位发射功率，降低雷达信号接收器的信噪比系数等一系列措施对雷达跟踪目标的偏差进行矫正，由于部分目标信号较为弱小，使雷达不能快速地、实时地对其进行检测，因此利用多普勒扩展来改善雷达监测性能运行环境从而提升相位的距离，进一步提升了雷达对目标跟踪的精准度。高速目标进行相位参数积累时，与目标相邻的回波信号有着固定时间的信号脉冲，相位时域上有着一定的延时，通过指数函数运算即可完成在时域上的延迟计算，能够显著地节省人工运算量，为相位控制偏差校

准提供了便利的条件^[8]。图 4 为相位脉冲模型图。

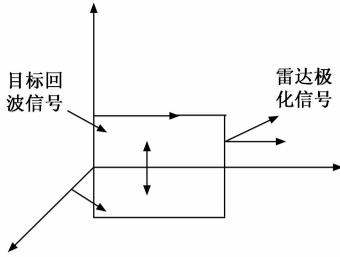


图 4 相位脉冲模型图

2 雷达目标跟踪偏差补偿方法

在完成了相位控制偏差校准的基础上，采用数据优先级方法实现目标跟踪偏差补偿方法。根据极化脉冲技术实现极化脉冲测角补偿；考虑阵列中互耦和阵列辐射特性不同以及波束指向下阵列极化特性差异提出雷达跟踪目标位置差异补偿方法，雷达合成波束的极化特性将会根据雷达扫描角度变化，使得雷达获取极化信息的敏感度趋向于波束角度，在相同的环境下雷达的计划信息提取更趋向于波束角度方向。据此精准地获取目标所在位置以及目标所发出的回波极化信息，实现雷达跟踪目标位置差异补偿；最后基于超分辨率成像技术完成目标跟踪偏差补偿后的雷达目标成像。

2.1 基于数据优先级的极化脉冲测角

极化脉冲技术能够克服雷达扫描顺序和天线波束敏感度对目标固有特性位置角度的测量问题，应用单个极化脉冲对雷达跟踪目标角度的测量技术已经成熟，这种传统的单一性极化脉冲在进行角度测量时，往往会受到天线极化和回波匹配程度的影响，当目标回波与天线的极化程度严重不匹配时，甚至会造成雷达跟踪目标丢失。本文为了避免这种问题出现，使用波束方向图与目标脉冲极化联合匹配，减小因为波形信号与目标极化失配而导致的目标位置角度偏差的产生。在常规的平面三维坐标系中，雷达将追踪目标的所在位置划分为四个不同的三维遥感模式如图 5 所示。

在象限图中雷达所发出的波束方向与目标所产生的波束方向形成零斜差率的波束线段，为了避免全极化天线特性对零斜差波束线段测角性能的影响，需要在合成零斜差波束线段的同时考虑极化特性的天线合并，零斜差波束测角中全极化天线合并是针对波束阵列而言，每个波束阵列都可能产生变频情况，所以需要让雷达直接采用 ADC 储存方式进行数字采样^[9]。

对零斜差波束线段和极化天线进行数字储存后，便可以通过数据直接进行测角，首先对脉冲的 N 极化和 Y 极化分别进行独立的求和求差并与波束的方向线段图相结合，再根据两极化交叉点所形成的信噪比关系进行非能量干扰合成，根据合成后的极化坐标数据可以直接对角度进行估

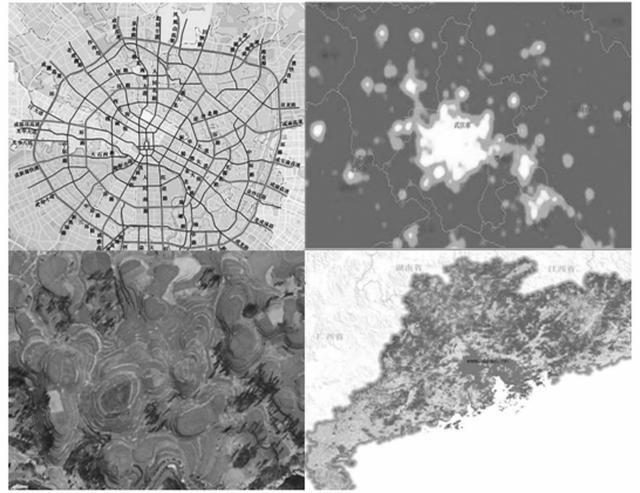


图 5 4 个不同的三维遥感模式图

计测量。本文为了确保所测量的角度具有精准性，应用基于最优级数字脉冲技术进行检验，首先对波束的阵列回波和目标的波数方向进行联合极化处理，获取脉冲的 N 极化和 Y 极化的测角输出通道，在通道中经过目标值的检测后，采用脉冲技术对目标的回波信号进行角度检验，然后根据检验目标的波束状态，将 N 极化和 Y 极化的角度输出通道进行最优匹配，分别将最佳的角度测量值，传入到雷达检测器中。测角方法的流程如图 6 所示。

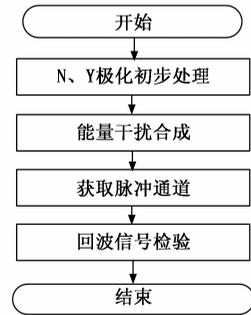


图 6 测角方法的流程图

2.2 雷达跟踪目标位置差异补偿方法

研究基于优先级的雷达目标方向图，是对雷达天线辐射特性分析的重要手段，对雷达目标方向图进行求解分析使雷达对目标的跟踪在目标方向方面有更高的突破，本文将进一步对全极化阵列方向图进行综合性分析，为了补偿雷达对目标跟踪测量的偏差。

本文在研究雷达目标方向图采用的分析方法是逆过程方法，首先获取雷达已经合成的雷达目标方向图特征，在雷达的数据端口进行求解和激励，将受到求解和激励的数据优先处理，使雷达所检测到的方向图特征与数据阵列的因子相乘，将最终的数据传输到雷达端口中综合优先级处理，传统的处理方法常常不对阵列与方向图之间的差异进

行合并极化, 进而导致雷达对目标跟踪测量位置产生偏移。本文将主要考虑阵列中互耦和阵列辐射特性不同以及波束指向下阵列极化特性差异提出雷达跟踪目标位置差异补偿方法, 对于极化队列控制的雷达波束, 仅需要对雷达波束因子进行数据化控制, 雷达合成波束的极化特性将会根据雷达扫描角度变化, 使得雷达获取极化信息的敏感度趋向于波束角度, 在相同的环境下雷达的计划信息提取更趋向于波束角度方向^[10]。

在雷达目标方向图中, 由于各个阵列的功率大小不同, 进而形成了雷达波束功率特性和波束的设计阵列方向图不完全匹配现象, 包括雷达目标方向图中的电平、零差斜率、波束深度等, 因此本文为了针对这些现象提出了全极化阵列雷达灵活空间扫描波束技术, 能够精准地获取目标所在位置以及目标所发出的回波极化信息, 但是这种技术需要同阵列的合成方向以及极化特性和波束功率同时的进行控制。

2.3 基于超分辨率成像技术的雷达目标成像

对雷达跟踪目标偏差进行补偿, 使雷达对目标具有超分辨率的图像是补偿方法的基础, 本文将通过雷达发射器所发出的宽带信号获取高分辨率的目标距离, 然后利用雷达控制平台对目标的相对运动进行分析, 使雷达控制系统对目标进行长时间的连续观测, 增强雷达对目标距离的分辨能力。对雷达目标进行超分辨成像需要雷达接收机的配合, 要求雷达接收机必须有应对目标宽带信号的能力, 能够有效地克服雷达信号的调频技术, 并且接收机在成像的过程中, 需要保证接收机内部设备的匀速运行, 确保目标等距离成像并将分辨率均匀分布。

现代雷达通常处于多功能多模式工作状态, 雷达可以在正常对目标跟踪的同时对目标进行三维空间等速旋转跟踪, 能够及时应对目标多普勒时间变化的回波信号, 在实际应用中, 雷达常常对多目标进行跟踪, 在完成高分辨率的目标成像功能之外, 还要同时完成大范围的目标搜索、跟踪定位等任务, 所以本文将在雷达体系中增加超分辨率成像技术, 有效地增强图像对比和目标成像定位精度, 利用 CPO 数据实现对目标超分辨率成像从低维数据观测转换到高维空间目标观测, 应用压缩感知理论探测目标稀疏信号, 可以应用较短的数据来实现高分辨率的目标成像。传统的雷达成像方法主要采用宽带外推, 这类方法主要是以线性预测和数据拟合的方式来对目标模型参数进行估计, 再通过小孔外推来提高分辨率, 这类方法很难对分散目标位置进行高精准度的高分辨率成像, 由于科技的不成熟不能够增加宽带外推的距离, 导致传统的超分辨率成像会因为噪声以及模型误差的原因产生偏移超分辨率成像。

由上述分析可知, 基于数据优先级实现极化脉冲测角测量, 考虑阵列中互耦和阵列辐射特性不同以及波束指向下阵列极化特性差异提出雷达跟踪目标位置差异补偿方法,

实现雷达目标跟踪偏差补偿。通过对增强雷达对目标距离的分辨能力, 去除噪声及模型误差造成的雷达目标跟踪图像的偏差量, 实现雷达目标补偿成像。

3 实验结果与分析

3.1 实验目的

为了验证本文方法的有效性, 在不同的角度对雷达对目标的跟踪偏差进行补偿, 以基于多路径反射的雷达目标跟踪偏差补偿方法为实验对比方法, 进行对比实验研究, 通过实验结果来证明本文方法的稳定可靠性。

3.2 实验过程及结果分析

首先, 设定雷达的信号宽带参数为 500 MHz, 载频为 6.5 GHz, 实验中调节脉冲的波束频率为 200 Hz, 选取雷达测量图中的多普勒宽度适中的超分辨率成像图, 预防实验出现偶然性, 两种方法分别对雷达跟踪目标的偏差进行多次补偿, 并分别采用 126 次脉冲回波技术对补偿结果进行检验, 应用雷达相位控制手段最大范围的减少周围环境信噪比的强度, 保障了实验环境的稳定性。为了表现两种方法下对雷达跟踪目标偏差补偿的精准程度, 将两种图像的最终结果图利用目标回波数的形式表现出来, 图 7 为精准度补偿对比图。

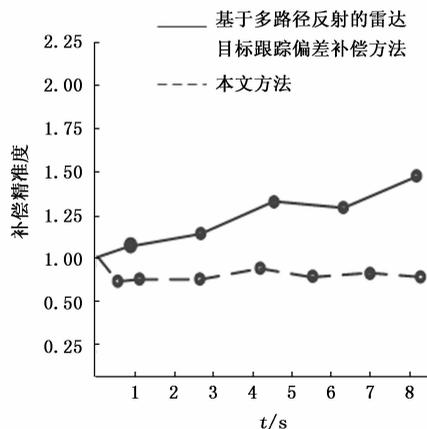


图 7 实验精准度补偿对比图

本文方法分别通过脉冲极化测角、对目标方向图、目标超分辨率图像、以及微弱信号测量同时进行偏差补偿, 通过脉冲极化测角测量确定雷达目标偏转角度, 减小因为波形信号与目标极化失配而导致的目标位置角度偏差的产生; 考虑阵列中互耦和阵列辐射特性不同以及波束指向下阵列极化特性差异, 根据雷达扫描角度变化, 精准地获取目标所在位置以及目标所发出的回波极化信息, 完成目标方位补偿, 最后通过超分辨率成像技术完成雷达目标补偿成像。

根据图中的对比结果可知, 基于多路径反射的雷达目标跟踪偏差补偿方法主要应用宽带外推的方式对雷达跟踪目

(下转第 230 页)