

基于 FPGA 的 GNSS 外辐射源合成孔径雷达成像算法设计与实现

王荣耀, 曾张帆, 刘文超, 周艳玲, 潘永才

(湖北大学 计算机与信息工程学院, 武汉 430062)

摘要: 提出了一种采用 FPGA 实现外辐射源合成孔径雷达成像的方法。在该雷达系统中, 发射机为 GNSS 卫星, 接收机静止放置在地球表面, 雷达天线指向附近的一处场景; 该雷达通过接收从场景区域反射的 GNSS 信号, 采用 Back-projection 算法进行二维成像; 实现成像方法的硬件平台是 Intel DE1-SOC, 该平台上搭载了由 Cortex-A9 以及 Cyclone V 系列的 FPGA 所组建的异构系统; 其中 Cortex-A9 负责系统的进程调度以及控制, FPGA 负责接收数据的运算处理; 该系统将流水处理与并行处理相结合, 充分利用了不同种类芯片的长处, 极大地提高了系统的效率; FPGA 强大的数据处理能力能够胜任运算量巨大的任务, 从而很大程度上解决了耗时长的问题; 文章最后采用上述硬件平台对 GNSS 外辐射源合成孔径雷达实测数据进行了成像处理, 获得的图像符合预期。

关键词: FPGA; 外辐射源合成孔径雷达; 成像

FPGA-based Passive Synthetic Aperture Radar Imaging Algorithm Design and Implementation

Wang Rongyao, Zeng Zhangfan, Liu Wenchao, Zhou Yanling, Pan Yongcai

(School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: An image formation method of passive synthetic aperture radar applied by FPGA programming is proposed. In the radar system, GNSS satellite is employed as the transmitter, while the receiver is fixed on the earth ground. The radar antenna points to a nearby field. The imaging formation is achieved by applying back-projection algorithm on the received radar signal from field of interest. All the work is implemented on the Intel DE1-SOC hardware platform, where a Cortex-A9 and Cyclone V FPGA is consisted of. The Cortex-A9 is taking care of scheduling and controlling, while FPGA is handling data calculation. The whole system benefits from high efficiency by exploiting the strengths of both kinds of chips after integrating pipeline and parallel processing. The strong data processing capability of FGPA enables it of huge computational task, thereafter solving long-last processing issues. In the end, a real data of GNSS passive radar is processed by using up-mentioned method and platform, the output coincides with our expectation.

Keywords: FPGA; passive SAR; imaging

0 引言

合成孔径雷达具有全天时、全天候、远作用距离和高分辨等特点, 在战场侦察、空间探测和民用遥感等领域具有重要的应用价值。双基合成孔径雷达由于其发射机与接收机在地理位置上分离, 因此具有安全性好等技术优势。外辐射源合成孔径雷达是一类采用第三方装置作为发射机的被动式雷达, 是传统双基合成孔径雷达的一个分支。

在 GNSS 外辐射源雷达系统中, 发射机为 GNSS 卫星, 可以是美国的 GPS, 俄罗斯的 GLONASS, 欧洲的 Galileo 或者是中国的北斗。而接收机可以部署在飞机上, 汽车上, 或者直接固定在地面, 地理位置十分灵活。该雷达系统拥

有安全性强, 观察角度丰富, 系统稳定性好, 部署成本低等技术优势, 已成为雷达业界的热点^[1-3]。

合成孔径雷达成像算法主要分为时域算法和频域算法。时域算法准确性高, 且运算复杂度不受雷达系统几何结构的变化而改变。缺点表现在运算量较大, 尤其在大场景情况下将十分严重。其代表性算法为 Back-projection (BP) 算法。频域算法效率高, 然而其数学建模与实现细节随雷达几何结构变换而改变, 且准确性较时域算法有一定差距。其代表性算法有 Range-Doppler (RD), Chirp Scaling (CS) 等。

FPGA 由于并行处理和编程灵活等特点, 已在合成孔径雷达成像中展现出广泛的应用。西安电子科技大学等相关团队纷纷开展了实用 FPGA 进行合成孔径雷达成像的研究^[4-7], 并取得了良好的实用效果。

GNSS 外辐射源合成孔径雷达在雷达作用距离、分辨能力、双基同步、理论成像方面均已有广泛的研究和成果。

收稿日期: 2017-11-20; 修回日期: 2018-01-08。

基金项目: 国家自然科学基金(61601175)。

作者简介: 王荣耀(1995-), 男, 湖北人, 主要从事合成孔径雷达方向的研究。

然而, 在实用化的研究方面存在空白。

本文采用 FPGA 对外辐射源合成孔径雷达成像进行处理。本文第一节介绍了外辐射源合成孔径雷达成像算法的理论依据; 第二节讨论了采用 FPGA 对该算法的设计与实现; 第三节给出了实测数据的成像结果与分析, 最后对本文进行了总结。

1 外辐射源合成孔径雷达成像算法

1.1 外辐射源合成孔径雷达信号模型

图 1 给出了外辐射源合成孔径雷达系统几何示意图。GNSS 卫星作为发射机, 沿预定轨道运行, 轨道高度距地球表面 20 000 km, GNSS 卫星不间断的向地球表面发射 GNSS 信号。雷达接收机搭载在无人机上, 无人机距地面 1 000 m, 沿直线匀速飞行。雷达接收天线照射方向与无人机飞行方向垂直。

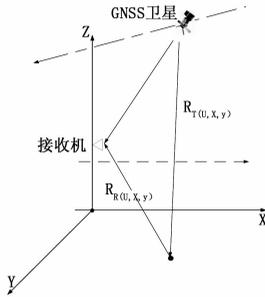


图 1 具有 GNSS 和固定接收机的 SS-BSAR 的几何图形

雷达接收机上配备两副天线, GNSS 直达波接收天线和雷达波接收天线。GNSS 直达波接收天线直接接收来自 GNSS 发射的信号, 该信号用于实现 GNSS 卫星与雷达接收机之间的同步。

假设 GNSS 卫星坐标表示为 (x_t, y_t, z_t) , 雷达接收机坐标为 (x_r, y_r, z_r) , 目标区域在 X-Y 平面内。点目标位于 $(x, y, 0)$, 正交解调后从该区域反射的接收信号可以表示为:

$$s(t, \mu) = P[t - \tau_2(u, x, y)] D_p[t - \tau_2(u, x, y)] e^{j[\omega_d(u, x, y)t + \phi_2(u, x, y)]} + j \times CA[t - \tau_2(u, x, y)] D_{ca}[t - \tau_2(u, x, y)] e^{-j[\omega_c(u, x, y)t + \phi_c(u, x, y)]} \quad (1)$$

其中:

$$\tau_2(u, x, y) = \frac{R_R(x, y) + R_r(u, x, y)}{c} \quad (2)$$

$$R_R(x, y) = \sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2 + z_r^2} \quad (3)$$

$$R_T(u, x, y) = \sqrt{(x_t - x)^2 + (y_t - y)^2 + z_t^2} \quad (4)$$

$$\phi_2(u, x, y) = \phi_{e2}(u, x, y) + \phi_{p2}(u, x, y) \quad (5)$$

$$\omega_{d2}(u, x, y) = \Delta\phi_2(u, x, y)/2\pi \quad (6)$$

$$\phi_{p2}(u, x, y) = 2 * \pi f_c \frac{R_R(x, y) + R_T(u, x, y)}{c} \quad (7)$$

$P[\]$ 是 P 码的包络, $CA[\]$ 是 CA 码的包络, $D_p[\]$ 是 P 码上携带的导航电文, $D_{ca}[\]$ 是 CA 码上携带的导航

电文, τ_2 是雷达波在传播过程中产生的延迟, R_R 是接收机到目标范围, R_T 是发射机到目标范围, ϕ_2 和 ω_{d2} 是雷达波接收信号的相位和多普勒, ϕ_{e2} 和 ϕ_{p2} 是由波传播引起的相位噪声和相位。

1.2 外辐射源合成孔径雷达成像 BP 算法

外辐射源合成孔径雷达成像 BP 算法主要包括两个步骤: 距离压缩和后向投影。

1.2.1 距离压缩

外辐射源合成孔径雷达距离压缩是将雷达波天线接收信号与参考信号在每个慢时间轴上实现距离方向上脉冲压缩。雷达波天线接收信号由式 (2.1) 所示, 参考信号为根据预处理后获得的 GNSS 直达波参数重构产生的信号。由于外辐射源合成孔径雷达预处理不在本文研究范围内容, 因此其相关内容不再赘述, 相关内容详见参考文献 [3]。根据预处理获得 GNSS 直达波参数, 重建产生的参考信号可以表示为:

$$S_{sync}(t_n, u) = P[t_n - \tau(u)] D_p[t_n - \tau(u)] \times e^{j(\omega_w(u)t_n)} e^{j[\Phi(u) - \Phi_p(u) - \Phi_n(u)]} \quad (8)$$

$$\tau(u) = \sqrt{\frac{(x_r - x_t)^2 + (y_r - y_t)^2 + (z_r - z_t)^2}{c}} \quad (9)$$

式中, $\tau(u, x, y)$ 是 GNSS 直达波接收信号的时间延迟。 $\omega_w(u)$ 是根据 GNSS 卫星官方轨道坐标和雷达接收机坐标计算获得的角速度。 $\Phi(u)$ 是 GNSS 直达波接收信号进行跟踪后获得的相位信息。 Φ_p 是根据 GNSS 卫星官方轨道坐标和雷达接收机坐标计算获得的相位信息, Φ_n 是 GNSS 直达波接收信号中提取的导航电文。从公式 (2.7) 可以看出, 本地生成的参考信号以 P 码为包络, 时间信息为 GNSS 直达波接收信号延迟, 频率为根据 GNSS 卫星坐标与雷达接收机位置计算或的多普勒历史, 相位为 GNSS 直达波接收信号跟踪获得的相位信息与名义相位信息以及导航电文引入的相位信息的差。

式 (2.7) 也可以表示为:

$$S_{sync}(t_n, u) = P[t_n - \tau(u, x, y)] D[t_n - \tau(u, x, y)] e^{j(\omega_w(u, x, y)t_n)} e^{j[\Phi_e(u, x, y)]} \quad (10)$$

其中:

$$\Phi_e(u, x, y) = \Phi(u) - \Phi_p(u) - \Phi_n(u) \quad (11)$$

因此, 结合式 (1) 和式 (11), 外辐射源合成孔径雷达距离压缩可以表示为:

$$S_{rc}(t, u) = s(t, u, x, y) \otimes S_{sync}(t_n, u) = CF_p[t - (\tau_2(u, x, y) - \tau(u))] \times e^{j[\phi_{p2}(u, x, y) + \phi_2(u, x, y) - \phi_2(u, x, y) + (\tau_2(u, x, y) - \tau(u))\pi]} + j \times P[t_n - \tau(t)] \otimes [t - (\tau_2(u, x, y) - \tau(u))] \times e^{j[\phi_{p2}(u, x, y) + \phi_2(u, x, y) - \phi_2(u, x, y) + (\tau_2(u, x, y) - \tau(u))\pi]} \quad (12)$$

式 (12) 中, 由于 C/A 码和 P 码的互相关为零, 因此式 (12) 中第二项为零, 只保留第一项。式 (12) 可以表示为:

$$S_{rc}(t, u) = CF_p[t - (\tau_2(u, x, y) - \tau(u))] e^{j\left[\frac{\phi_{p2}(u, x, y) + \phi_2(u, x, y) - \phi_2(u, x, y) + (\tau_2(u, x, y) - \tau(u))\pi}{(\tau_2(u, x, y) - \tau(u))\pi}\right]} \quad (13)$$

式 (13) 中包括距离压缩后信号的包络以及相位, 包括的幅度为相关函数 CF_p []。相位信息包括三部分:

其中第一项 $\phi_{p2}(u, x, y)$ 是雷达信号在目标 $(x, y, 0)$ 处产生的相位, 用于成像过程中的方位向压缩。

第二项 $\phi_{c2}(u, x, y) - \phi_c(u, x, y)$ 是由 GNSS 直达波接收信号和雷达波接收信号之间的接收机噪声, 气氛伪影等引起的相位误差的差异。由于在本雷达系统中, 两通道结构特性一致, 因此该项近似为零。

第三项 $(\tau_2(u, x, y) - \tau(u))\pi$ 是由导航消息相移引起的两通道之间的相位差。该值取决于雷达波传输路径和直达波传输路径的差, 如果距离差在一个导航信息周期内, 则该值为零。由于导航消息间隔为 20 毫秒, 这对应于 $D_{critical} = c \times 20 \text{ ms} = 6 \text{ 000 km}$, 这大大超过雷达波与直达波传输路径的差值, 因此, 该项为零。

依据上述分析, 距离压缩信号可以简化为:

$$S_{rc}(t, u) = CF_p [t - (\tau_2(u, x, y) - \tau(u))] \times e^{j\phi_{p2}(u, x, y)} \quad (14)$$

式 (14) 表明, 通过距离向压缩, 信号的相位信息只包含了雷达波信号传输引入的相位。

1.2.2 后向投影

距离压缩之后, 将进行后向投影运算, 具体步骤如下。

1) 对所有目标的快速时间信号进行 Sinc 插值操作:

$$Ind_{interp} = [\tau_2(u, x, y) - \tau(u)] \times f_{ADC} \quad (15)$$

其中: f_{ADC} 是 ADC 的采样频率。组合方程 (14) 和 (15), 内插后方位向实践 u 中来自目标 $(x, y, 0)$ 的压缩信号可以表示为:

$$S_{rci}(t, u) = CF_p [t - (\tau_2(u, x, y))] \times e^{j\phi_{p2}(u, x, y)} \quad (16)$$

2) 方位向匹配滤波。方位向匹配滤波器表达式为:

$$S_{azi}(u, x, y) = e^{j2\pi f_c \frac{R_{center}(x, y) - R}{c}} \quad (17)$$

其中: f_c 是卫星信号载波频率, R_{center} 是合成孔径中心和场景中心之间的斜距。

因此, 引入式 (16) 和 (17), 方位向压缩可以表示为:

$$f(x, y) = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} S_{rci}(t, u) S_{azi} * (u, x, y) du = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} CF_p [t - (\tau_2(u, x, y))] \times e^{j2\pi f_c \frac{R_{center}(x, y) - R}{c}} du \quad (18)$$

式 (18) 可以看出, 方位向压缩后, 位于 $(x, y, 0)$ 的点目标聚焦。

2 基于 FPGA 的 SAR 成像算法实现

本文以 DE1 SOC 为硬件平台, 在 QuartusIII4.0 开发环境下, 用 Verilog HDL 语言设计实现了外辐射源合成孔径雷达成像算法, 其总体框架如图 2。

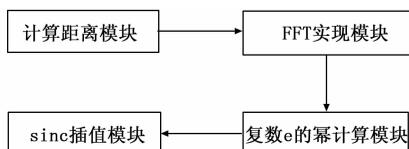


图 2 外辐射源合成孔径雷达 FPGA 实现总体框图

该成像算法流程包括四个模块: 距离计算模块、FFT 实现模块、复数 e 的幂计算模块一级 Sinc 插值模块。其主要模块为计算距离模块以及 FFT 实现模块, 下文将详细介绍这两个模块。

2.1 计算距离模块

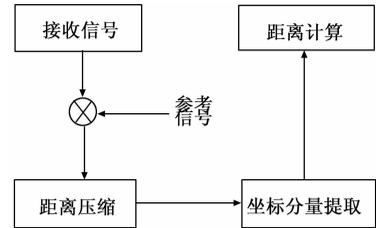


图 3 计算距离模块

该模块将接收到的信号与模块内部的参考信号进行匹配滤波, 实现距离压缩, 从而提取出用于计算的坐标分量。经由公式 $L = \sqrt{(x_t - x_r)^2 + (y_t - y_r)^2 + (z_t - z_r)^2}$, 可以得到发射机与接收机之间的距离 L , 计算的具体实现借助 Quartus II 内部的运算功能 IP 核, 以保证计算结果的精确度。

2.2 FFT 实现模块

在本文提出的成像算法中, FFT 运算模块实现时域与频域之间的转换, 其具体实现结构包含以下部分: PLL 分频模块, 数据存储模块, 控制模块, FFT 计算模块等。FFT 模块流程如图 4 所示。

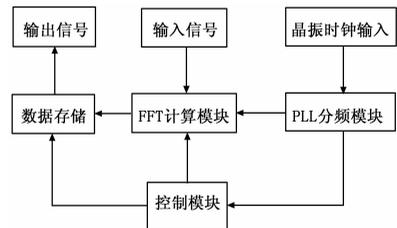


图 4 FFT 模块实现流程图

其中 PLL 分频模块提供不同频率的时钟, 控制模块控制 FFT 计算模块按照正确的时序进行读取数据操作和数据输出操作, 数据存储模块保存输出的数据供后续使用。

2.2.1 PLL 分频模块

时钟的分频由锁相环技术实现。通过更改锁相环电路的比例参数, 电路能够将输入的时钟信号分频或倍频从而得到所需频率。为了保证时钟信号稳定可靠, 本文采用官方提供的 PLL 功能 IP 核。

2.2.2 控制模块

控制模块包括 FFT 控制模块和数据存储控制模块, 控制模块的作用是控制 FFT 算法模块和存储模块进行数据处理和存储。

数据存储控制模块使得 FFT 输出与数据存储保持时间同步, 能够进行正常的的数据读取。FFT 控制模块是对 FFT 计算模块进行一定的时序约束, 使其按照所需的时序进行工作。

2.2.3 FFT 计算模块

FFT 计算模块包括 FFT IP 核、FFT 幅值校正模块、异步时钟存储模块, 时钟信号由外界提供。

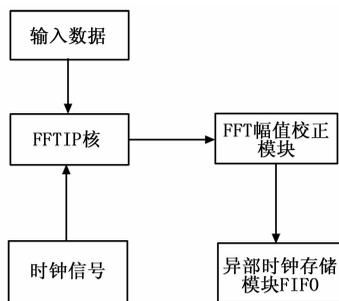


图 5 FFT 算法模块

其中 FFT 幅值校正模块对 FFT 功能 IP 核输出的结果进行进一步处理。参考官方提供的数据手册, 从 FFT 功能 IP 核输出的数据还要与旋转因子相乘, 根据旋转因子的精度位数, 要对数据进行添加补位码的操作, 此模块即用以实现此功能。

由于 FPGA 中 FFT 的高速处理与系统时钟不匹配, 因此需要一个异步时钟域存储模块作为缓冲, 从而将两者衔接, 使整个系统正常工作。

3 实测数据处理结果与分析

本节采用实测数据成像对上述方法进行了验证。雷达和实验参数如下: GNSS 卫星采用俄罗斯卫星 GLONASS 732, 工作频率为 1 603.687 5 MHz, 信号带宽为 5 MHz。卫星离地面高度为 22 000 km。成像场景位于英国伯明翰大学图书馆附近, 合成孔径时间为 5 分钟。成像场景照片如图 6 所示。

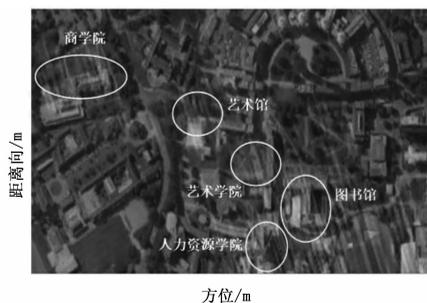


图 6 成像场景照片

可以看出, 该成像区域有 5 处较明显的目标, 其它区域为草坪和树木。因此, 在成像结果中, 预计在明显目标处将获得强反射, 而其它区域的反射拟较弱。

图 7 为采用本文提出的 FPGA 成像处理方法处理得到的图像

图上的最强点为雷达波天线直接接收 GNSS 直达波成像结果, 像点位置为坐标原点, 与预期相符。图 8 给出了该成像场景光学卫星的图像和图 7 的叠加结果。

可以看出, 两幅图像中主要目标像点的位置一致。此外, 在光学卫星图像中观察到的若干弱反射区域, 如草坪、

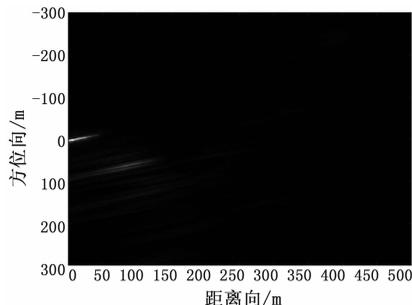


图 7 采用本文提出的 FPGA 成像方法得到的图像

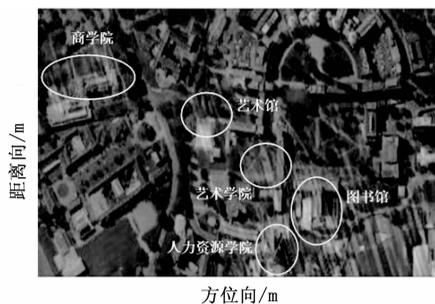


图 8 图 7 与光学图像叠加结果

树木等, 雷达图像中显示的回波均较弱, 与预期相符。

4 结束语

本文研究了基于 BP 算法的外辐射源合成孔径雷达硬件成像处理方法。该方法运行在 Intel DE1-SOC FPGA 平台上。通过构建计算距离模块、FFT 模块、指数运算模块、插值模块, 实现了一整套 BP 算法的硬件处理流程。

文中最后给出实测数据进行处理得到的二维图像结果, 并将该结果与相同场景的光学图像进行了对比, 验证了本文提出的成像处理方法的有效性和准确性。

参考文献:

- [1] Sanz-Marcos H, Mallorqui J J, Aguiar A. Bistatic fixed-receiver parasitic SAR processor based on the back-projection algorithm [Z]. IGARSS, 2005.
- [2] Qiu X, Hu D, Ding C. Non-linear chirp scaling algorithm for one-stationary bistatic SAR [Z]. APSAR, 2007, 111-114.
- [3] Liu F, Liu H, Hu C. Modified range migration algorithm in SS-BSAR [A]. IET International Radar Conference [C]. 2009, 1-4.
- [4] 郑晓双, 禹卫东. 机载 SAR 实时运动补偿和成像的 FPGA 实现 [J]. 数据采集与处理, 2008 (5): 614-618.
- [5] 周芳, 唐禹, 张佳佳, 等. 机载高分辨聚束式 SAR 实时成像处理系统的 FPGA 实现 [J]. 电子与信息学报, 2010 (2): 1248-1252.
- [6] 柯磊, 庞龙. 扫描 SAR 成像中 SPECAN 算法的 FPGA 实现 [J]. 电讯技术, 2016 (3): 319-323.
- [7] 孔祥辉, 张晓东, 等. 一种机载 SAR 中心控制板的设计 [J]. 火控雷达技术, 2016 (2): 26-30.