

外辐射源多通道前视 SAR 接收机系统设计与实现

王承昊^{1,2} 刘飞峰^{1,2} 王战泽^{1,2} 徐智祥^{1,2}

(1. 北京理工大学信息与电子学院雷达技术研究所, 北京 100081;
2. 卫星导航电子信息技术教育部重点实验室(北京理工大学), 北京 100081)

摘要: 外辐射源多通道前视双基地 SAR 作为一种新体制观测系统, 具有构型设计灵活、前视成像幅宽大、目标区域信噪比高、隐蔽性强、成本低、部署便捷等显著优势。为了拓展外辐射源多通道前视双基地 SAR 的应用实践, 本文设计了一种新型小型化外辐射源多通道前视双基地 SAR 接收机系统, 可部署于地面和小型无人机上, 并完成了原理样机的整机集成和调试, 在实验室环境下输入频率步进的单频点信号进行测试, 并进行了实测场景成像实验, 验证了系统设计的正确性和实用性。

关键词: 多通道前视 SAR; 双基地 SAR; 外辐射源; 系统设计与实现

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2022.01.007

引用格式: 王承昊, 刘飞峰, 王战泽, 等. 外辐射源多通道前视 SAR 接收机系统设计与实现[J]. 信号处理, 2022, 38(1): 55-63. DOI:10.16798/j.issn.1003-0530.2022.01.007.

Reference format: WANG Chenghao, LIU Feifeng, WANG Zhanze, et al. Design and implementation of multi-channel forward-looking SAR receiver system with uncooperative illuminators [J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(1): 55-63. DOI:10.16798/j.issn.1003-0530.2022.01.007.

Design and Implementation of Multi-channel Forward-looking SAR Receiver System with Uncooperative Illuminators

WANG Chenghao^{1,2} LIU Feifeng^{1,2} WANG Zhanze^{1,2} XU Zhixiang^{1,2}

(1. Radar Research Laboratory, School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Electronic and Information Technology in Satellite Navigation (Beijing Institute of Technology), Ministry of Education, Beijing 100081, China)

Abstract: As a new observation system, the multi-channel forward-looking bistatic SAR with Uncooperative illuminators has significant advantages such as flexibility for configuration design, wide forward-looking imaging areas, High signal-to-noise ratio in target areas, strong concealment, low cost, and convenience for deployment. This paper designs a new miniaturized multi-channel forward-looking bistatic SAR receiver with uncooperative illuminators to expand the application practice of the system, which can be implemented on ground or mini UAV platforms, and complete the integration and debugging of the principle prototype, then input frequency stepped single-frequency signals in laboratory environment and carry out the actual imaging experiment, to verify the correctness and practicality of system design.

Key words: multi-channel forward-looking SAR; bistatic SAR; uncooperative illuminators; system design and implementation

1 引言

外辐射源前视多通道SAR是一种以非合作照射源作为发射机,具有多个位于目标场景区域正前方的接收单元的双基地SAR系统。外辐射源前视多通道SAR与传统正侧视收发一体SAR系统相比,具有构型设计灵活、前视成像幅宽大、目标区域信噪比高、生存能力强、体积小、成本低等显著优势,能够快速部署在地面或小型无人机等轻型载荷上,实现对正前方敏感区域的有效监测,在地面重点目标监视、物资空投、精确制导打击等需求下具有重大实用价值。

近年来,国内外已开展一系列关于双基地SAR系统的研究。日本东京大学、法国、意大利联合研究团队采用对地静止卫星发射的连续数字电视信号作为外辐射源,构建地基外辐射源双基地SAR系统,可以对100 m以内的不同目标(如栅栏,灯杆,树木和汽车)成像^[1]。意大利和英国学者利用导航卫星作为外辐射源的多基地SAR系统,对海面目标进行检测和定位^[2-4]。Hajar Abedi等人对外辐射源双基地SAR穿墙成像进行了研究^[5]。欧空局研究团队使用C波段的卫星Sentinel作为非合作外辐射源,在地面部署接收机,进行双基地干涉实验^[6]。

国内,北京理工大学在包头地区开展小型无人机电载前视双基地SAR实验,并提出一种改进的NCS算法用于实测数据处理^[7];以北斗二代导航卫星作为外辐射源,地面部署接收机的方式,开展GNSS-BSAR城区成像和形变反演实验^[8-15]。电子科技大学相继提出了一种双基地前视SAR嵌入运动参数估计的FFBP算法^[16]、一种针对高速机动前视SAR的PFA算法^[17]、一种用于扩展空-时杂波抑制的双基地前视SAR MP-DPCA方法^[18]。西安电子科技大学提出了一种基于椭圆正交基坐标的双基地前视SAR的FFBP算法^[19]。中科院提出了一种多基地SAR俯仰多通道强距离向模糊估计和去除方法^[20]。

目前国内外研发的大部分双基地SAR系统,存在前视成像质量低、通道数少、系统开发成本高、部署难度大等问题。为了进一步发掘双基地SAR系统的应用潜力,本文设计了一种小型化多通道外辐射源前视双基地SAR接收机系统,并完成了系统的整机集成和调试工作。第2部分对多通道外辐射源

前视双基地SAR接收机系统的组成和各模块的功能,以及双基地同步方案进行了详细阐述。第3部分展示了输入频率步进的单频点信号,系统的测试结果,同时也获得了实测转发器成像结果,验证了系统设计、开发的正确性与实用性。第4部分对本文的工作进行了总结。

2 外辐射源多通道前视双基地SAR接收机系统

2.1 外辐射源多通道前视双基地SAR接收机系统组成

外辐射源前视SAR多通道接收机系统包含4个独立的回波通道和一个直达波通道,可以保证在任意双基地构型下直达波的有效接收。系统主要包括总控分机、双通道数字分机、射频分机、组合导航分机、时频分机、伺服分机、二次电源分机、飞控模块(地面控制台)。其组成结构简图如图1所示。

射频分机的主要功能是从天线接收Ku波段射频信号,对射频信号进行下变频处理,将中频信号传送至3个数字分机。接收机系统共有5个射频分机,即5个信号通道,其中4个接收回波信号,1个接收直达波信号。采集直达波信号是为了在数据处理环节进行精确的发射机和接收机时频同步处理^[21]。

数字分机的主要功能有:(1)采集、存储来自5个射频模块的回波信号和直达波信号。1个数字分机有2路AD,其中2个数字分机用于采集、存储4路回波信号,1个数字分机采集和存储1路直达波信号,即3个数字分机共采集和存储5路信号。(2)伺服分机控制功能。1个数字分机接收到来自总控分机的控制指令后,对伺服分机下发姿态控制信息,使伺服分机指向预设的角度。

总控分机是外辐射源前视SAR多通道接收机系统最核心部分,主要功能有:(1)同步时钟分发功能。总控分机接收来自时频同步模块的1 pps触发脉冲和20 MHz正弦同步工作时钟,将1 pps触发脉冲分发至3个数字分机,将20 MHz正弦同步信号分发至3个数字分机和5个射频模块,实现系统各分机之间的时频同步。(2)控制指令分发功能。总控分机接收飞控模块(地面控制站)发送的控制指令通过RS422协议分别发送至3个数字分机,通过SPI协议发送至5个射频模块,同时接收3个数字分机

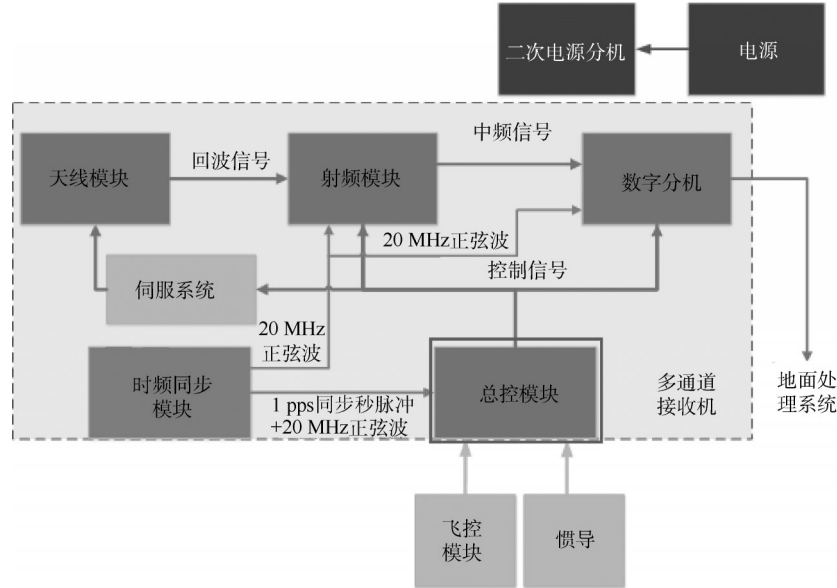


图 1 多通道外辐射源前视双基地 SAR 接收机系统简图

Fig. 1 System diagram of multi-channel forward-looking bistatic SAR receiver with Uncooperative illuminators

和 5 个射频模块的工作状态反馈信息,再将反馈信息传回飞控模块(地面控制站),实现系统控制指令和工作状态信息在各个分机间的传输。(3)姿态信息分发功能。总控分机接收来自惯导模块(组合导航模块)的姿态信息,将姿态信息传送至 1 块信号处理板,实现系统姿态信息在各分机间的传送。总控分机与其他分机的连接简图如图 2 所示。

伺服分机的功能是接收来自数字分机的姿态控制指令,调整天线的俯仰、方位角度,确保接收机天线波束指向与发射机一致,实现波束指向同步。同时将工作状态信息反馈至数字分机。惯导(组合导航模块)的功能是定时为系统提供当前位置、速度、加速度等运动状态信息,将运动状态信息传输至总控分机。飞控(地面控制站)向系统提供配置参数,包括脉冲宽度、PRT、回波和直达波起始采样时间、射频模块增益、伺服俯仰角、伺服方位角、距离向采样点数、起始频点等。二次电源向系统各分机提供使其正常工作的电压和电流。时频同步模块为系统提供同步脉冲和参考时钟。

对各硬件分机进行整合组装,外辐射源前视 SAR 多通道接收机系统硬件整机如图 3 所示。各硬件分机都安装在吊舱中,吊舱重量约 10.4 kg,可部署于小型无人机上,吊舱与支撑结构固定后,可较为便捷地部署在地面上。

外辐射源前视 SAR 多通道接收机系统整机集成后,对整机进行调试,使硬件系统各分机与飞控(地面控制站)之间协同工作。调试环境如图 4 所示。调试所需仪器包括示波器和频谱仪等。

2.2 外辐射源多通道前视双基地 SAR 时频同步方案

为了增加外场实验的可控性与便捷性,选定机载雷达发射机作为外辐射源。机载雷达的发射信号体制一般为脉冲信号,单点目标的基带回波信号的表达式可建模如下:

$$s_r(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^K \text{rect}\left(\frac{t - T_n - \tau_k(n)}{T_p}\right) s_0(t - T_n - \tau_k(n)) \exp\left(j\left(\phi(n, t - \tau_k(n)) - \phi'(n, t)\right)\right) \quad (1)$$

其中, T_n 为第 n 个脉冲的实际发射时刻, T_p 为发射脉宽, $\tau_k(n)$ 为第 k 个目标的第 n 个脉冲的回波延时。当考虑系统频率误差时,发射机第 n 个脉冲的实际的发射时刻为 T_n , 载频的瞬时频率误差为 $f_c(t)$, 那么有 $f_c(t) = f_0 + f_c(t)$, 第 n 个脉冲实际发射的载波相位为:

$$\phi(n, t) = \int_0^t 2\pi(f_0 + f_c(t')) dt' + \phi_0, \quad T_n < t < T_n + T_p \quad (2)$$

其中 ϕ_0 是发射机相参振荡信号的初始相位。

接收机实际接收时刻为 $T_n + \tau(n)$, 本振的瞬时频率误差为 $f_c'(t)$, 那么有 $f_c'(t) = f_0 + f_c'(t)$, 接收机

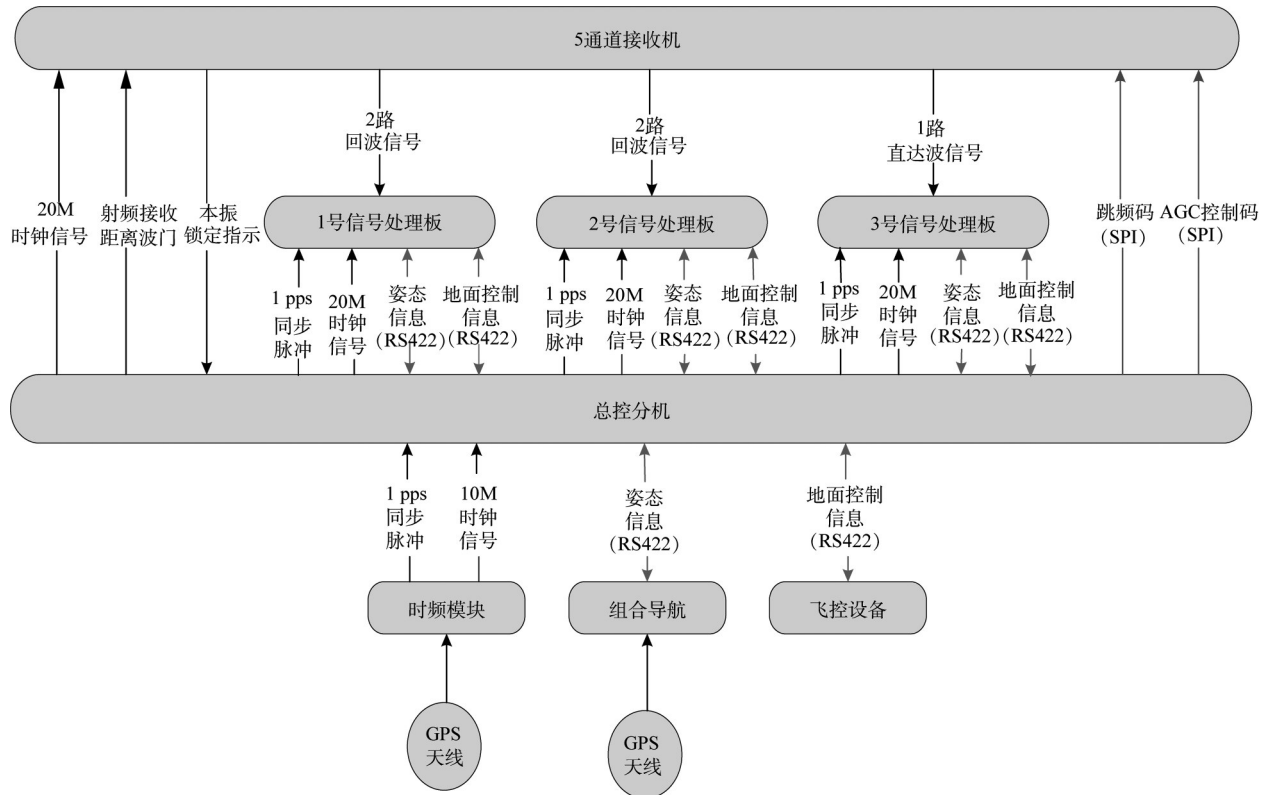


图2 总控分机与其他分机连接简图

Fig. 2 Connection diagram of master control extension and other extensions

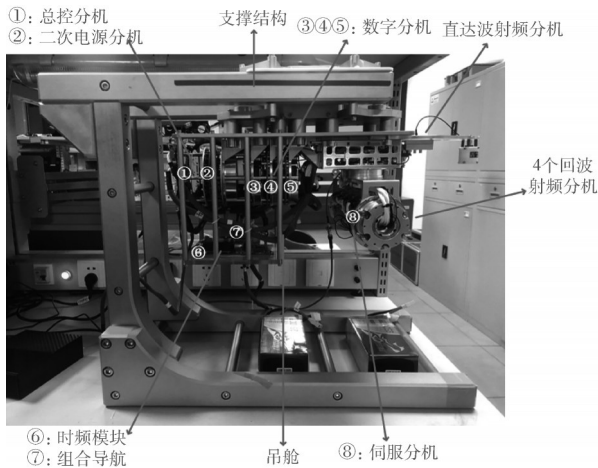


图3 外辐射源前视SAR多通道接收机系统硬件整机图

Fig. 3 Hardware of multi-channel forward-looking bistatic SAR receiver with Uncooperative illuminators

进行相位检波时的相位是:

$$\phi'(n, t) = \int_0^t 2\pi(f_0 + f_c'(t'))dt' + \phi_0',$$

$$T_n + \tau(n) < t < T_n + \tau(n) + T_p \quad (3)$$

ϕ_0' 是接收机相参振荡信号的初始相位。

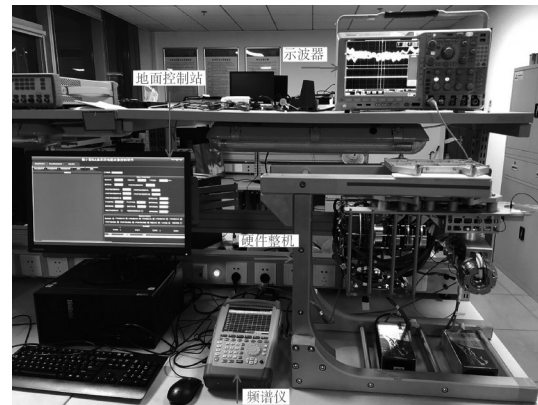


图4 外辐射源前视SAR多通道接收机系统硬件调试

Fig. 4 Hardware debugging of multi-channel forward-looking bistatic SAR receiver with Uncooperative illuminators

相干检波提取的相位差为:

$$\theta(n, t) = \phi(n, t - \tau(n)) - \phi'(n, t) = \phi_0 - \phi_0' + \int_0^{t-\tau(n)} 2\pi(f_0 + f_c(t'))dt' - \int_0^t 2\pi(f_0 + f_c'(t'))dt',$$

$$T_n + \tau(n) < t < T_n + T_p + \tau(n) \quad (4)$$

其中:

$$\theta_0 = \phi_0 - \phi_0' \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \theta_1(n, t) = & \int_0^{t-\tau(n)} 2\pi(f_0 + f_c(t')) dt' - \\ & \int_0^{t-\tau(n)} 2\pi(f_0 + f_c'(t')) dt' = \int_0^{t-\tau(n)} 2\pi(f_c(t') - f_c'(t')) dt' - \\ & \int_{t-\tau(n)}^{t'} 2\pi(f_c'(t')) dt', T_n + \tau(n) < t < T_n + T_p + \tau(n) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\theta_2(n) = -2\pi f_0 \tau(n) \quad (7)$$

当频率误差满足 $f_c(t) \ll \frac{1}{T_p}$, $f_c'(t) \ll \frac{1}{T_p}$ 时, 可以将脉冲宽度内的相位误差看做常数, 那么该相位误差对距离向脉冲压缩影响可以忽略, 此时:

$$\begin{aligned} \theta_1(n, t) \approx \theta_1(n, T_n + \tau(n)) = & \int_0^{T_n} 2\pi(f_c(t') - f_c'(t')) dt' - \\ & \int_{T_n}^{T_n + \tau(n)} 2\pi(f_c'(t')) dt', T_n + \tau(n) < t < T_n + T_p + \tau(n) \end{aligned} \quad (8)$$

相位误差只随慢时间变化:

$$\begin{aligned} \theta(n) = \theta(n, t) = & \theta_0 + \theta_1(n, t) + \theta_2(n) \approx \theta_0 + \\ & \theta_1(n, T_n + \tau(n)) + \theta_2(n) \end{aligned} \quad (9)$$

表达式中, $\theta_2(n) = -2\pi f_0 \tau(n)$ 对应方位向多普勒相位项, 用于进行方位向的匹配滤波; $\theta_0 = \phi_0 - \phi_0'$ 对应发射载波信号与接收载波信号初始时刻相位差, 不影响成像; $\theta_1(n, T_n + \tau(n))$ 对应收发之间频率同步误差和时间同步误差而引入的随慢时间变化相位误差, 相位误差的形式有频率误差的形式决定, 影响最终的成像。如果 $f_c(t)$ 和 $f_c'(t)$ 均为固定值, 则慢时间域存在线性相位误差, 造成方位向移位; 若 $f_c(t)$ 和 $f_c'(t)$ 随慢时间成线性变化, 则相位上存在二次相位误差项和线性相位误差项, 造成方位向散焦。 $f_c(t)$ 和 $f_c'(t)$ 的随机抖动, 则会造成噪声基底抬高。

以下面的系统参数为例, 给出双基地 SAR 系统对时间同步误差和频率同步的要求, 并最终转换成系统对频率基准的误差要求。工作频率 $f_0 = 15$ GHz, 脉冲宽度 $T_p = 3 \mu\text{s}$, 发射带宽 $B = 50$ MHz, 合成孔径时间 $T_a = 1.5$ s, PRT = 100 μs , 采样率 $f_s = 160$ MHz, 发射机速度 $V_t = 20$ m/s, 接收机静止, 发射机作用距离 $R_T = 1$ km, 接收机作用距离 $R_r = 5$ km。时间同步误差要求图像在距离向上的位移小于一个聚焦深度, 双基地情况下调频斜率为:

$$f_{dr}(R_T) = \frac{-v_T^2}{\lambda(R_T + R_r)} = -0.36 \text{ Hz/s} \quad (10)$$

调频斜率随斜距变化率为:

$$\frac{df_{dr}}{d(R_T + R_r)} = \frac{v_T^2}{\lambda(R_T + R_r)^2} = 0.000059 \text{ Hz/(m}\cdot\text{s)} \quad (11)$$

一个聚焦深度内允许的最大调频斜率变化为

$$\Delta f_{dr} = \frac{1}{T_a^2} = 0.44 \text{ Hz/s}, \text{ 对应的聚焦深度 } \Delta R_T =$$

$$\frac{\Delta f_{dr}}{\frac{df_{dr}}{dR_T}} = 7458 \text{ m}, \text{ 最大时间同步误差需要满足 } \Delta t <$$

$$\frac{\Delta R_T}{c} = 24.86 \mu\text{s}。$$

要求一个合成孔径时间内由于时间漂移引入的最大距离走动小于 0.5 个距离分辨单元, 对应的最大时间漂移 $\Delta t_{\max} < 0.5 * \frac{1}{B} = 10$ ns, 收发之间频率

基准的相对频率偏差应当满足 $\sigma = \frac{\Delta f}{f_0} < \frac{\Delta t_{\max}}{T_{\text{syn}}} = 6.67 \times 10^{-9}$ 。

频率源输出频率随时间的线性变化因子应当满足 $k_e < \frac{1}{T_a^2} = 0.44 \text{ Hz/s}$, 单位时间频率漂移应当

$$\text{满足 } k_{\text{drift}} = \frac{\Delta f}{f_0} < \frac{0.44}{16e9} = 2.76 \times 10^{-11}。$$

外辐射源多通道前视双基地 SAR 的时频同步方案分为粗同步和精同步两个步骤。粗同步实现方案是发射机和接收机系统使用同一规格的时频同步模块, 通过收发间高稳定相参的 1 pps 脉冲维持帧同步信号和 PRT 信号的产生, 实现时间同步; 利用高精度频率 20 MHz 参考信号实现收发系统本振、中频信号的相参和频率同步。对两个时频模块输出的 20 MHz 信号进行了采集, 分析单个 PRT 内两路信号的相位偏差, 结果如图 5 所示。

统计可得, 相位偏差标准差为 0.0288 rad, 对应的相对频率偏差为 $\frac{0.0288}{2\pi f_0} = 2.29e^{-10} < \sigma$, 满足收发之间频率基准的相对频率偏差指标。通过多次测量, 得到频率误差系数随时间变化的关系, 如下表 1 所示。

时频同步模块随着工作时间的增加, 其精度指

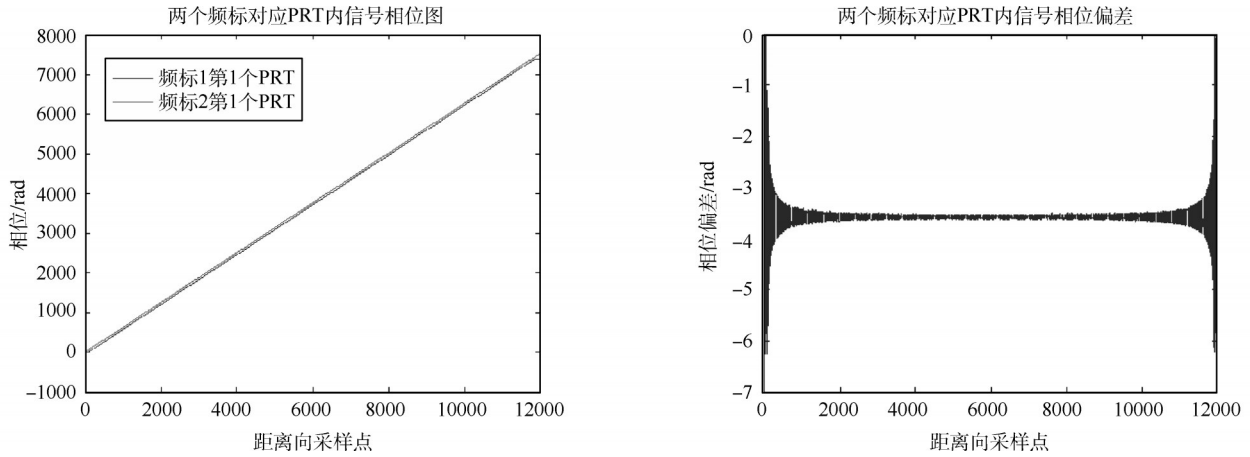


图5 收发时频同步模块20 MHz信号相位同步评测结果

Fig. 5 20 MHz signal phase synchronization evaluation result between transmitter and receiver

表1 频率误差系数随时间变化量

Tab. 1 Change of frequency error coefficient with time

工作时间	频率误差系数
7分钟	3.87×10^{-10}
15分钟	5.08×10^{-11}
30分钟	2.50×10^{-11}
60分钟	3.41×10^{-11}
90分钟	5.69×10^{-11}
120分钟	1.24×10^{-11}

标有所提高,频率误差系数也即准确度能达到 $1e^{-11}$ 量级,满足单位时间频率漂移精度指标。时频同步模块的1 pps秒脉冲的时间同步精度为 ± 20 ns,满足时间同步精度指标,因此该时频同步模块可以用于外辐射源双基地SAR的粗同步时频基准。

同一PRT内,直达波信号或者转发器的信号与目标场景回波信号的相位同步误差可以认为是一致的,则目标场景回波信号的相位同步误差可以通过提取直达波或转发器信号的相位误差来补偿。因此,针对目前双基地SAR系统中相位同步误差随机抖动较大的情况,可以利用直达波信号或在目标场景中设置转发器来提取随机相位同步误差,从而补偿目标场景的相位同步误差,进一步提升同步精度。

直达波可看作是只含单个点目标、信噪比非常高的单程回波信号,利用直达波提取相位同步误差可以补偿场景回波的相位,总体方法是:采集场景回波和直达波数据,对直达波数据进行距离向脉冲压缩,提取直达波各个PRT的脉压峰值点,从而得

到各个PRT的峰值点相位,之后对峰值点相位进行拟合,提取出每个PRT的随机相位同步误差,利用提取的随机相位同步误差对场景回波的相位逐PRT进行补偿,从而减小了随机相位同步误差,实现精同步。

3 多通道外辐射源前视SAR接收机系统测试及外场实验结果

为了验证多通道外辐射源前视SAR接收机系统的实用性,在实验室环境下进行测试。测试方法如下:使用一台Ku波段信号源作为发射机,分别输出多个频率步进的正弦信号,将信号通过射频线缆馈送至一个喇叭天线,喇叭天线正对接收机的4个回波射频模块。回波射频模块接收到信号后,对信号进行放大和下变频处理,下变频本振信号由飞控(地面控制站)输入的参数控制,输出信号的中心频率固定。射频模块将中频信号传输至数字分机的存储器。即输入信号为:

$$s_i(t) = \sin[(f_0 + n\Delta f)t + \varphi_0] \quad (12)$$

其中, f_0 是输入信号起始频率, Δf 为频率步增量, n 为输入的单频点信号个数, φ_0 为输入信号的初始相位。

输出信号为:

$$s_o(t) = A \sin(2\pi f_i t + \varphi) \quad (13)$$

其中, A 为输出增益, f_i 为输出中频。

读取存储器中的数据文件,对数据进行FFT处理,检验数据文件是否包含喇叭天线辐射出的正弦信号。五通道的数据处理结果如图6所示。

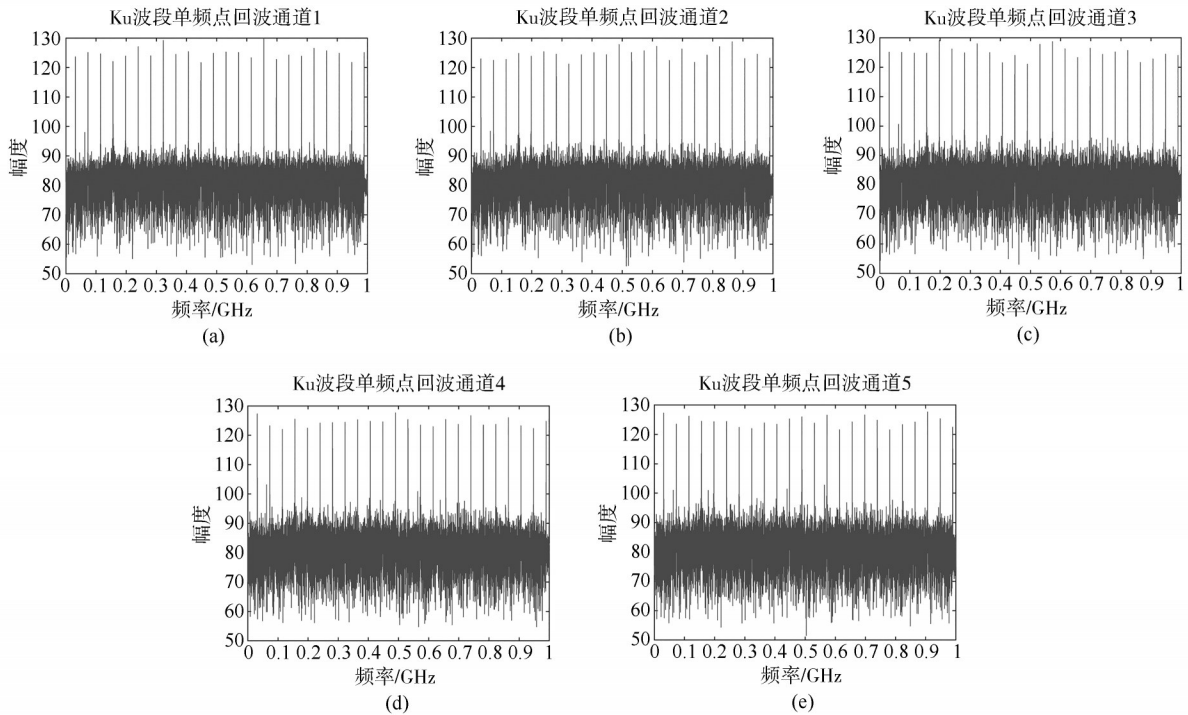


图6 通道一和通道五单频点数据FFT处理结果。(a), (b), (c), (d), (e)分别是通道1,通道2,通道3,通道4,通道5的处理结果

Fig. 6 FFT processing results of single frequency point data of channel one and channel five. (a), (b), (c), (d), (e) are the processing results of channel 1, channel 2, channel 3, channel 4 and channel 5

通道一和通道五都显示出频率步进单频点正弦信号的FFT谱线,表明系统正确接收到了来自信号源的外辐射信号,系统工作正常,表明系统具有接收大带宽信号的能力,验证了系统设计和实现的正确性。

在连云港海滨城区开展实测实验,发射平台选用无人机载非合作发射机,接收机采用上述自主研发的多通道接收机原理样机。成像场景位于城区,主要包含了几个十字路口,一些建筑物,并人工放置了一个转发器作为强散射点。实验参数如下表2所示。

外场实验开展方案如下图7所示。多通道接收机静止放置在一座小山顶上,位于目标场景的东南方向,距离场景中心的作用距离约5 km。外辐射源发射机在目标场景的北边飞行。

四通道合成后的外辐射源前视成像结果如下图8所示。从成像结果可以较为清晰地看到成像场景内自然景物的轮廓信息,比如图像中偏左侧存在一些较强的散射点,是十字路口和一些建筑物形成

表2 实验参数

Tab. 2 Parameters of the experiment

参数	数值
接收机通道数	5(1个直达波通道,4个回波通道)
波段	Ku
带宽	50 MHz
脉冲重复周期	100 μ s
合成孔径时间	1.5 s
接收天线方位/俯仰宽度	24°/10.5°
接收天线面积	0.018 m ²
接收脉宽	12.8 μ s

的,转发器位于十字路口的左侧边缘处,是成像场景内的最强散射点。转发器十字路口右侧中间位置还有一个十字路口,右侧有一条道路,与光学图像中场景的分布情况能够对应上。前视成像结果的成像幅宽达到了1 km,体现了多通道体制对于成像幅宽的提升效果。



图7 实验场景

Fig. 7 Scene of experiment

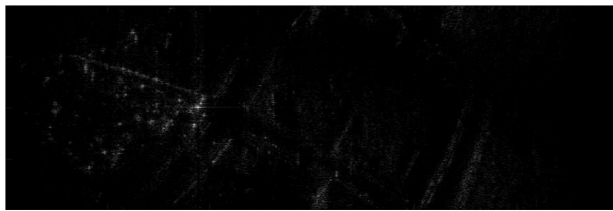


图8 多通道合成后实测前视成像

Fig. 8 Actual forward-looking image after multichannel forming

4 结论

为了进一步拓展双基地 SAR 系统的应用潜力, 本文设计了一种小型化的外辐射源多通道前视 SAR 接收机系统, 阐述了收发时频同步精度指标和同步方案, 完成了系统集成与测试, 开展外辐射源多通道前视双基地 SAR 外场实验, 获取了多通道合成的实测前视成像结果, 验证了接收机系统的实用性。后续还将开展外辐射源前视多通道 SAR 运动补偿、高分辨成像、抗干扰等方面的研究, 进一步挖掘该系统的研究价值。

参考文献

[1] FENG Weike, FRIEDT J M, NICO G, et al. Passive bistatic ground-based synthetic aperture radar: Concept, system, and experiment results [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(15): 1753.

[2] ANTI F, PIERALICE F, PASTINA D. Joint detection and localization of vessels at sea with a GNSS-based multistatic radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 5894-5913.

[3] MA Hui, ANTONIOU M, PASTINA D, et al. Maritime moving target indication using passive GNSS-based bistatic radar [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(1): 115-130.

[4] MA Hui, ANTONIOU M, STOVE A G, et al. Maritime moving target localization using passive GNSS-based multistatic radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(8): 4808-4819.

[5] ABEDI H, ZAKERI B. Through-the-multilayered wall imaging using passive synthetic aperture radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(7): 4181-4191.

[6] ANGHEL A, CACOVEANU R, MOLDOVAN A S, et al. COBIS: opportunistic C-band bistatic SAR differential interferometry [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(10): 3980-3998.

[7] ZENG Tao, WANG Zhanze, LIU Feifeng, et al. An improved frequency-domain image formation algorithm for mini-UAV-based forward-looking spotlight BiSAR systems [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2680.

[8] ZENG Tao, AO Dongyang, HU Cheng, et al. Multiangle BSAR imaging based on BeiDou-2 navigation satellite system: Experiments and preliminary results [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(10): 5760-5773.

[9] ZENG Tao, ZHANG Tian, TIAN Weiming, et al. Space-surface bistatic SAR image enhancement based on repeat-pass coherent fusion with Beidou-2/compass-2 as illuminators [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(12): 1832-1836.

[10] ZENG Tao, ZHANG Tian, TIAN Weiming, et al. A novel subsidence monitoring technique based on space-surface bistatic differential interferometry using GNSS as transmitters [J]. *Science China Information Sciences*, 2015, 58(6): 1-16.

[11] LIU Feifeng, FAN Xuezhen, ZHANG Lingzhi, et al. GNSS-based SAR for urban area imaging: Topology optimization and experimental confirmation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(12): 4668-4682.

[12] LIU Feifeng, FAN Xuezhen, ZHANG Tian, et al. GNSS-based SAR interferometry for 3-D deformation retrieval: Algorithms and feasibility study [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(10): 5736-5748.

[13] 张天. 基于导航卫星的双基地差分干涉 SAR 形变反演技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2018.

ZHANG Tian. Change Detection Using Global Navigation Satellite System based Bistatic Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018. (in Chinese)

- [14] 范学祯, 刘飞峰, 张天, 等. 基于北斗导航卫星的BiSAR大场景成像[J]. 信号处理, 2017, 33(4): 546-550.
FAN Xuezhen, LIU Feifeng, ZHANG Tian, et al. Large scene imaging of BiSAR using Bei Dou navigation satellite system [J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(4): 546-550.(in Chinese)
- [15] 曾涛, 刘飞峰, 田卫明, 等. 基于导航卫星的InBSAR信号处理与实验验证[J]. 信号处理, 2020, 36(3): 317-327.
ZENG Tao, LIU Feifeng, TIAN Weiming, et al. GNSS-based InBSAR signal processing and experimental confirmation [J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(3): 317-327.(in Chinese)
- [16] PU Wei, WU Junjie, HUANG Yulin, et al. Fast factorized backprojection imaging algorithm integrated with motion trajectory estimation for bistatic forward-looking SAR [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(10): 3949-3965.
- [17] ZHANG Qianghui, WU Junjie, LI Zhongyu, et al. PFA for bistatic forward-looking SAR mounted on high-speed maneuvering platforms [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(8): 6018-6036.
- [18] LI Zhongyu, LI Shanchuan, LIU Zhutian, et al. Bistatic forward-looking SAR MP-DPCA method for space-time extension clutter suppression [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(9): 6565-6579.
- [19] ZHOU Song, YANG Lei, ZHAO Lifan, et al. A new fast factorized back projection algorithm for bistatic forward-looking SAR imaging based on orthogonal elliptical polar coordinate [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(5): 1508-1520.
- [20] ZHAO Qingchao, ZHANG Yi, ROBERT Wang, et al. Estimation and Removal of Strong Range Ambiguities in Multistatic Synthetic Aperture Radar With Multiple Elevation Beams [J]. IEEE Transactions on Geoscience and

Remote Sensing Letters. 2019, 16(3): 407-411.

- [21] ZHOU Peng, PI Yiming, DAI Yongshou. A frequency synchronization method for hybrid bistatic SAR using direct path signal [C]//2010 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Chengdu, China. IEEE, 2010: 1-4.

作者简介



王承昊 男, 1996年生, 河南洛阳人。2018年在北京理工大学获得电子信息工程工学学士学位, 现为北京理工大学信息与电子学院硕士研究生。主要研究方向是双基地SAR系统设计与信号处理。

E-mail: wch_bit@163.com



刘飞峰 男, 1983年生, 陕西渭南人。2012年在北京理工大学信息与电子学院获得博士学位, 现担任北京理工大学信息与电子学院副教授。主要研究方向为双/多基地SAR信号处理、GEOSAR成像算法和SS-BiSAR目标检测等。

E-mail: feifeng_liu@bit.edu.cn



王战泽 男, 1995年生, 河南洛阳人。2017年在北京理工大学获得电子信息工程工学学士学位, 现为北京理工大学信息与电子学院博士研究生。主要研究方向是双基地SAR成像、基于导航卫星的形变测量。

E-mail: 3120195426@bit.edu.cn



徐智祥 男, 1998年生, 安徽亳州人。2020年在北京理工大学获得自动化学士学位, 现为北京理工大学信息与电子学院硕士研究生。主要研究方向是双基地SAR系统设计与信号处理。

E-mail: 18811603792@163.com