

文章编号:1004-9037(2014)04-0654-07

环境一号 C 卫星 SAR 闭环测试系统的设计与实现

张华春 岳海霞 禹卫东

(中国科学院电子学研究所,北京,100190)

摘要:环境一号 C(HJ-1-C)卫星合成孔径雷达系统测试中,构建闭环测试系统,模拟卫星地信号传输过程,实现 SAR 系统成像功能、压缩方式和点目标特性的测试。本文首先给出 SAR 回波信号的产生以及回波模拟器的物理实现,然后提出在有线和无线两种方式下,利用回波模拟器构建 SAR 闭环测试系统的方法,最后给出基于该闭环测试系统,对 HJ-1-C SAR 系统点目标性能指标测试结果。测试结果表明,该闭环测试系统的构建,能够满足 HJ-1-C SAR 系统的测试需要。

关键词:合成孔径雷达;HJ-1-C 卫星;闭环测试系统;回波信号模拟

中图分类号:TN958 **文献标志码:**A

Design and Implementation of HJ-1-C Satellite SAR Closed-Loop Test System

Zhang Huachun, Yue Haixia, Yu Weidong

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

Abstract: The synthetic aperture radar (SAR) closed-loop test system is constructed to simulate ground-satellite signal transmission process for obtaining SAR system imaging function, compression mode and point target characteristics. Those are of great significance during HJ-1-C SAR system test. Firstly, the paper presents the SAR echo signal generation and the physical implementation of echo simulator, and then provides methods to build SAR closed-loop test systems using echo simulator under wired and wireless manner. Finally, the paper gives the point target performance results of HJ-1-C SAR system based on the closed-loop test system. Test results show that the closed-loop test system meets the testing needs of HJ-1-C SAR system and has good engineering application value.

Key words: synthetic sperture radar (SAR); HJ-1-C Satellite; closed-loop test system; echo signal simulation

引 言

星载合成孔径雷达因为其众多的优点,成为世界各国研究的热点。HJ-1-C 卫星是我国环境与灾害监测预报小卫星星座 3 颗卫星中的 1 颗合成孔径雷达小卫星,其有效载荷为 S 波段(3 200 MHz)合成孔径雷达(SAR),具有全天时、全天候对地观测能力。

卫星发射前,在地面对 SAR 系统指标的闭环测试,保证了 HJ-1-C 卫星 SAR 系统的发射成功;

卫星发射后,通过对系统内定标数据的分析比对,可以考察系统指标的稳定性和验证闭环测试系统设计的有效性。HJ-1-C 卫星 SAR 研制过程中,为了对系统性能指标进行充分测试,利用回波模拟器模拟产生 SAR 回波信号,构建了 HJ-1-C SAR 有线和无线闭环测试系统。

SAR 回波信号仿真,对于检验 SAR 系统的性能,验证系统参数的合理性及各种成像算法的优劣等都具有极其重要的意义,因而许多单位都在致力于对 SAR 回波模拟器的研究。针对回波模拟器的研究,已有若干文献加以介绍^[1-3]。在回波仿真研

究过程中,复杂的地物目标被简化为人造的点目标,点目标回波模拟器在对 SAR 系统的空间分辨率、峰值旁瓣比和积分旁瓣比等指标的评估及成像算法验证等方面具有重要作用。针对 HJ-1-C SAR 系统采用大功率集中发射、网状抛物面天线的技术体制,本文给出 SAR 回波信号的产生以及回波模拟器的实现过程,并给出基于回波模拟器的 SAR 闭环测试系统的构建,以及在 HJ-1-C SAR 系统测试中,利用该闭环测试系统,SAR 性能指标的测试结果。

1 SAR 闭环测试系统

1.1 点目标回波信号模型

SAR 系统发射和接收都是一串线性调频信号,发射的脉冲串可表示为

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a(t-nT) \cdot \exp(j\omega_c(t-nT) + j\pi k_r(t-nT)^2) \quad (1)$$

其中:

$$a(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < \Delta \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中: ω_c 为载波频率, k_r 为线性调频率。

设一个点目标距卫星的距离为 $r_1(t)$,则回波信号可表示为

$$\begin{aligned} s(t) &= \sigma \cdot \omega_a(t-r_1(t)/c) \cdot f(t-2r_1(t)/c) = \\ & \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma \cdot \omega_a(t-r_1(t)/c) \cdot a(t-nT- \\ & 2r_1(t)/c) \cdot \exp[j\omega_c(t-nT-2r_1(t)/c) + \\ & j\pi k_r(t-nT-2r_1(t)/c)^2] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma \cdot \\ & \omega_a(t-r_1(t)/c) \cdot \exp(-j4\pi r_1(t)/\lambda) \cdot \\ & a(t-nT-2r_1(t)/c) \cdot \exp[j\omega_c(t- \\ & nT) + j\pi k_r(t-nT-2r_1(t)/c)^2] \quad (2) \end{aligned}$$

式中: σ 为点目标的雷达截面积; $\omega_a(t-r_1(t)/c)$ 为 SAR 到该点目标方向的雷达天线增益函数; λ 为雷达发射的电磁波波长; c 为光速。考虑到 $r_1(t)$ 和 $\omega_a(t)$ 在脉冲周期上相对雷达发射波形变化很慢,因而可用 $r_1(nT)$ 和 $\omega_a(nT)$ 去代替上式的 $r_1(t)$ 和 $\omega_a(t)$ 。信号经相干解调后形式如下

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma \cdot \omega_a(nT) \cdot \exp(-j4\pi r_1(nT)/\lambda) \cdot \\ & a(t-nT-2r_1(nT)/c) \cdot \exp[j\pi k_r(t- \\ & nT-2r_1(nT)/c)^2] \quad (3) \end{aligned}$$

令 $\sigma=1$, $r=c(t-nT)/2$, $x=vnT$, v 为遥感器沿航

迹的速度,则 SAR 对点目标的冲击响应函数为

$$\begin{aligned} h(x,r) &= \omega_a(x) \cdot \exp(-j4\pi r_1(x)/\lambda) \cdot \\ & \delta(r-r_1(x)) \otimes \delta(x) \cdot a(r) \cdot \exp(j4\pi k_r \cdot \\ & r^2/c^2) = h_1(x,r) \otimes h_2(x,r) \quad (4) \end{aligned}$$

式中:

$$\begin{aligned} h_1(x,r) &= \omega_a(x) \cdot \exp(-j4\pi r_1(x)/\lambda) \cdot \\ & \delta(r-r_1(x)) \quad (5) \end{aligned}$$

$$h_2(x,r) = \delta(x) \cdot a(r) \cdot \exp(j4\pi k_r \cdot r^2/c^2) \quad (6)$$

可以看出, $h_2(x,r)$ 所代表的是与发射脉冲相同的距离向线性调频信号。 $h_1(x,r)$ 的轨迹是二维曲线,也即距离徙动曲线。距离徙动是指合成孔径过程中,雷达与目标之间的斜距变化超过了一个距离分辨单元,使得来自同一目标的回波信号在距离向分布于不同的距离单元内,造成了信号在方位向和距离向的耦合。为了减小由于距离徙动所引起的距离和方位之间的耦合,同时为了回波模拟器的设计方便,在原始数据的产生过程中,将此二维曲线变为一维形式,变化后的形式为

$$\begin{aligned} h_1(x,r) &= \omega_a(x) \cdot \exp(-j4\pi r_1(x)/\lambda) \cdot \\ & \delta(r-r_0(x)) \quad (7) \end{aligned}$$

式中: $r_0(x)$ 为多普勒中心处卫星与目标之间的距离。

1.2 HJ-1-C SAR 回波信号

HJ-1-C SAR 系统回波模拟器,利用上述的信号模型,模拟产生雷达接收通道所需要的二维 chirp 信号。

回波模拟器要完成点目标地面场景的模拟,星载 SAR 系统参数的模拟,要求计算机具有很高的运算速度,能够完成数据的实时传输。设计中选用 PC 机作为数据平台,利用高速 PCI 总线实现数据实时传输。由式(5,6)可以看出,在距离向,回波信号是发射线性调频信号经一定延时后的信号;在方位向,由于地球自转造成的距离走动,以及雷达和目标相对运动产生的距离弯曲,距离徙动现象比较严重,在模拟过程中采用式(7),一方面降低了硬件设计的难度,另一方面在一定程度上减小了模拟过程中距离徙动对点目标成像的影响。HJ-1-C 卫星 SAR 回波信号模拟过程如下:

(1)根据卫星参数模拟卫星椭圆轨道;(2)计算卫星运行过程中,SAR 系统和目标之间的距离;(3)计算目标距离向徙动值;(4)计算方位向相位历程;(5)根据天线方向图产生方位向加权函数。

1.3 SAR 回波模拟器

图 1 给出回波模拟器实现的原理框图。回波

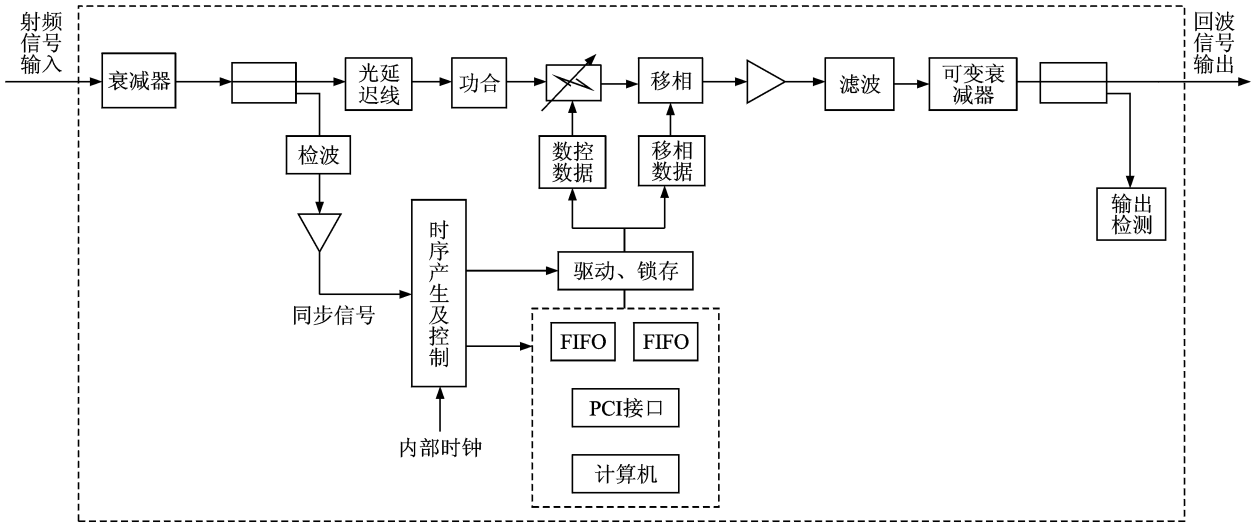


图1 HJ-1-C SAR回波模拟器原理

Fig. 1 Block diagram of HJ-1-C SAR echo simulator

模拟器的输入信号为接收 SAR 系统发射耦合的线性调频信号,输出信号为回波模拟器产生的点目标回波数据。

回波模拟器的输入射频信号,经衰减器和耦合器件分为两路射频信号。一路射频信号经检波和放大,作为系统同步信号;另外一路射频信号,作为光延迟单元输入,光延迟单元根据光电转换原理,将输入的线性调频信号转换为光信号,经光纤延迟线延时,再经光电转换后输出具有不同时延的 4 路线性调频信号,经信号功合后,数控衰减器对其进行幅度调制,移相器实现信号的相位调制。完成方位向调制(幅度和相位调制)后的信号,经过放大、滤波、可变衰减器和耦合器件输出所产生的回波信号,实现一维输入线性调频信号向二维线性调频信号的转换。

模拟器根据系统参数、目标类型、成像几何关系,通过用户界面设置距离向和方位向点目标的个数和加权函数的有无,模拟产生回波原始数据,打包后,FIFO 完成数据的缓冲,在确定的逻辑时序控制下,经 PCI 总线实现原始数据的实时输出。输出数据控制数控衰减器和移相器,实现距离向数据的徙动和方位向数据的移相与加权。模拟器可以根据实际的测试需要调节输出回波信号大小。

设计的回波模拟器具有如下功能:(1)点目标模拟;(2)模拟器具有有线和无线测试能力;(3)距离向和方位向多点目标模拟;(4)点目标位置:方位向可变,距离向单点可变;(5)方位向加权函数可控;(6)点目标对应的雷达系统参数,按照卫星要求

进行设定;(7)输入信号功率约 8~9 dBm;(8)输出信号功率约-50~20 dBm。

1.4 HJ-1-C SAR 闭环测试系统

在 HJ-1-C SAR 系统测试中,可以采取有线和无线两种测试方式来构成闭环测试系统。有线测试主要为了在系统集成测试中更加详细的测量 SAR 性能指标。无线测试主要用于 SAR 全功率试验。有线工作模式,距离向产生 1 个可控延时点目标,方位向可产生 1 个或多个点目标。

在系统测试中,回波模拟器的 PRF 同步信号采用内部互联,时钟 CLK 信号由内部时钟提供。固态发射机输出信号经过有线或无线耦合后的输出信号,作为回波模拟器的输入射频信号。回波模拟器产生的延时后的点目标模拟回波信号,通过测试环形器、定向耦合器或无线方式,送回到雷达系统接收通道,完成点目标试验。通过对不同工作模式下的回波数据记录、分析,进行 SAR 系统点目标成像的性能评估。下面按照有线和无线两种连接方式,给出 HJ-1-C SAR 系统基于回波模拟器的闭环测试系统的组成,以及利用该闭环测试系统, HJ-1-C SAR 性能指标的测试结果。

2 SAR 系统有线连接性能指标测试

图 2 给出 HJ-1-C SAR 系统组成和基于回波模拟器的有线闭环测试系统原理框图。四端口环形器与馈线之间加入测试用 40 dB 定向耦合器,通过该定向耦合器来耦合 SAR 系统的发射信号,利用回波模拟器进行 8:3BAQ 有线点目标测试,测试

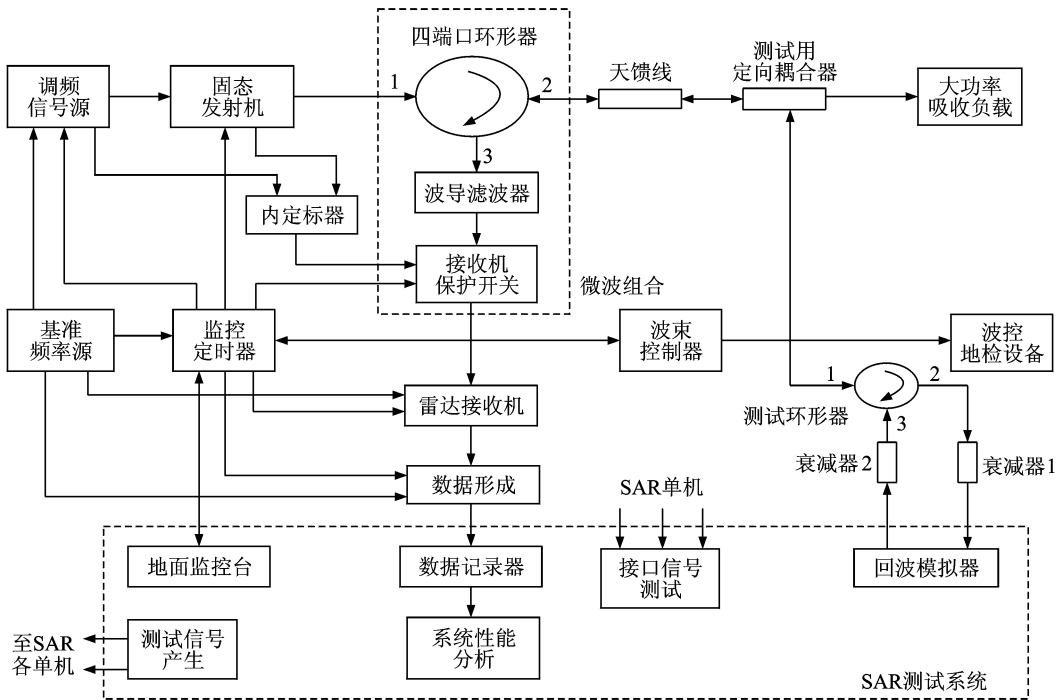


图 2 SAR 系统有线闭环测试原理

Fig. 2 Block diagram of the SAR wired (cable) closed-loop test system

SAR 系统满功率发射时,在有线连接方式下的系统性能指标。

测试数据流通路:调频信号源输出→固态发射机→天馈线间串接的定向耦合器→测试用环形器→衰减器→回波模拟器(光延迟线设置 125 μs 延时)→衰减器→测试用环形器→天馈线间串接的定向耦合器→四端口环形器→微波组合输入口→雷达接收机→数据形成→数据记录器。测试有线连接方式下的 SAR 系统性能指标。

调整可变衰减器 1 的衰减量,使得回波模拟器射频输入端口电平约为 8~9 dBm,回波模拟器中的光延迟线按照延时 125 μs 进行测试连接。回波模拟器输出射频功率电平约为 18 dBm,回波模拟器加入方位信息,考虑指令中雷达接收机 MGC=40 的设置和接收机增益的大小,回波起始时间为 122 μs,调整可变衰减器 2 的衰减量,使得雷达接收机 I/Q 视频输出电平 V_{pp} 约为 600~700 mV。

下面给出有线测试 BAQ 回波信号的时域波形显示,如图 3 所示。

对数据记录器记录的数据进行分析,测试 SAR 系统性能指标:积分旁瓣比、峰值旁瓣比等。分析结果见图 4,5 和表 1 所示。

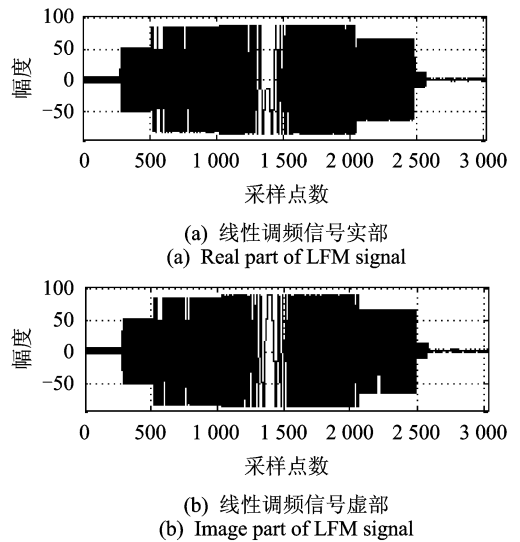


图 3 SAR 系统有线测试 BAQ 回波信号

Fig. 3 BAQ echo signal of the SAR wired test systems

表 1 SAR 系统有线闭环测试结果

Table 1 Test results of SAR wired closed-loop systems

测试项目	指标要求	加权前	加权后
方位分辨率	5 m	2.68 m	2.89 m
峰值旁瓣比	优于-20 dB	-12.44 dB	-20.26 dB
积分旁瓣比	优于-12 dB	-8.98 dB	-18.22 dB
距离分辨率	5 m	2.33 m	2.69 m
峰值旁瓣比	优于-20 dB	-13.60 dB	-22.95 dB
积分旁瓣比	优于-12 dB	-11.34 dB	-19.66 dB

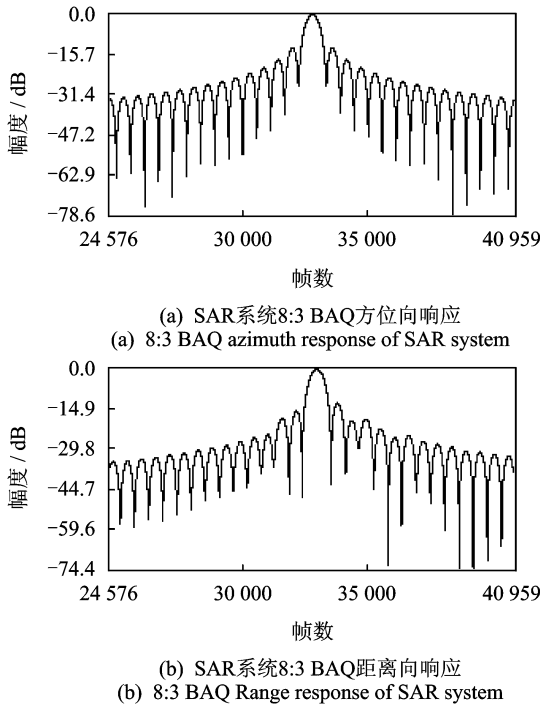


图4 系统有线点目标距离向和方位向响应
Fig. 4 Range and azimuth response of wired system point target

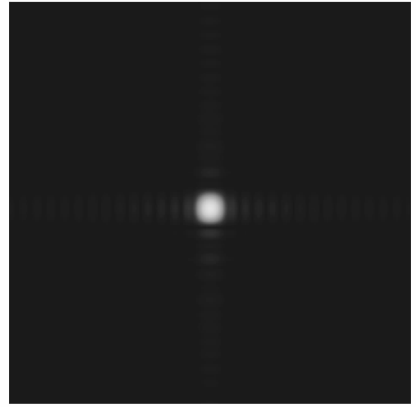


图5 SAR有线点目标图像(BAQ数据)
Fig. 5 Point target image of SAR wired system (BAQ data)

3 SAR系统无线连接性能指标测试

图6给出基于回波模拟器的无线闭环测试系统原理框图。SAR系统天线阵面展开到位,多波束馈源放置在天线焦平面的预定位置,在微波暗室进行固态发射机满功率辐射试验时,利用无线方式接收固态发射机满功率发射信号、延迟并移相后作为回波信号,构成无线闭环测试系统。

S波段固态发射机满功率发射时,产生的大功率射频信号通过多波束馈源发射后,经网状抛物面天线辐射出去。无线回波模拟器通过接收喇叭接

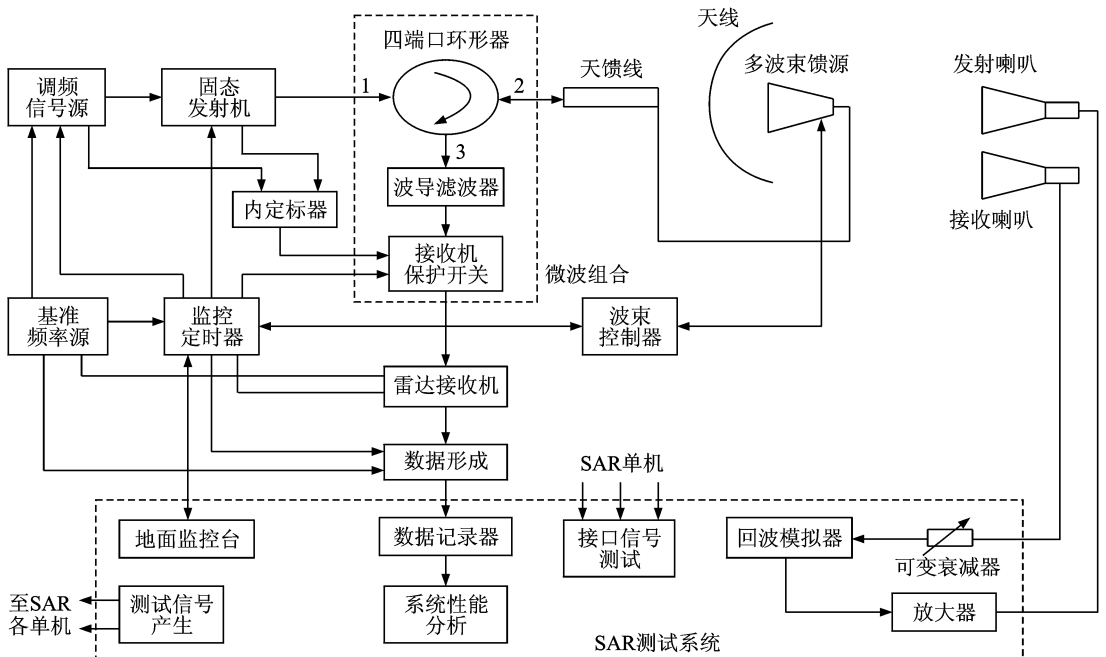


图6 SAR系统无线闭环测试原理

Fig. 6 Block diagram of the SAR wireless closed-loop test system

收 SAR 天线空间辐射信号,经过延时、放大、调制、滤波和数控衰减,形成 SAR 相干的回波信号,由发射喇叭向外部空间发射,发射的回波信号被 SAR 天线和多波束馈源接收后,送入 SAR 系统接收通道,经数据形成器打包,送给数据记录器。数据回放和处理设备对数据记录器记录的回波数据进行分析处理,得到系统全回路性能指标,包括:测试系统发射通道性能指标,接收通道性能指标,系统的空间分辨率,峰值旁瓣比和积分旁瓣比等性能指标。

测试数据流通路:调频信号源输出→固态发射机→天馈线馈源喇叭辐射→网状抛物面天线辐射→接收喇叭接收信号→衰减器→回波模拟器(光延迟线 $45 \mu\text{s}$ BAQ)→放大器→发射喇叭→网状抛物面天线接收→天馈线馈源喇叭接收→四端口环形器→微波组合输入口→雷达接收机→数据形成→数据记录器。无线闭环测试主要测试无线连接方式下的 SAR 系统性能指标。

无线测试时,光延迟线延迟 $45 \mu\text{s}$,回波模拟器产生点目标回波信号,SAR 系统设置回波采样起始 $40.32 \mu\text{s}$,MGC=50 dB,BAQ 工作模式。记录回波数据分析结果见图 7,8 和表 2 所示。测试结果表明,SAR 系统无线连接情况下的性能指标符合设计要求,与相同工作模式下的有线测试结果比

对一致。

SAR 系统在全功率辐射试验时,进行了雷达各种工作模式(常规模式、缺省模式、一次开机多次成像、立刻更新成像参数等)的测试,通过对记录数据脉冲压缩,进行图像分析处理,结果表明 SAR 系统成像功能正常,点目标响应的分辨率、积分旁瓣比和峰值旁瓣比等性能指标符合任务书要求。

表 2 SAR 系统有线无线测试点目标指标对比

Table 2 Points target performance comparison between SAR wired and wireless test systems

测试项目	指标要求 (理想)	测试结果(未加权)	
		无线	有线
方位分辨率	5 m	2.18 m	2.68 m
方位峰值旁瓣比	-13.3 dB	-12.44 dB	-12.44 dB
方位积分旁瓣比	-9.7 dB	-8.98 dB	-8.98 dB
距离分辨率	5 m	2.27 m	2.33 m
距离峰值旁瓣比	-13.3 dB	-12.15 dB	-13.60 dB
距离积分旁瓣比	-9.7 dB	-10.68 dB	-11.34 dB

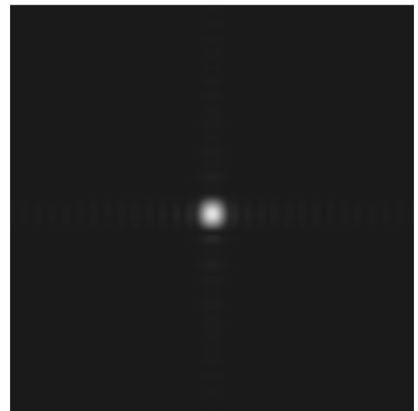
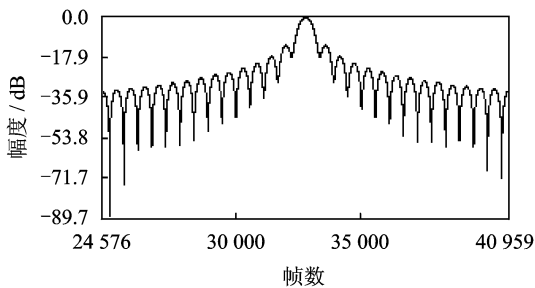
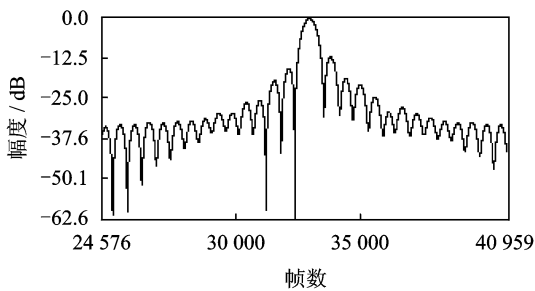


图 8 SAR 无线点目标图像(BAQ 数据)

Fig. 8 Point target image of SAR wireless system (BAQ data)



(a) SAR系统8:3 BAQ方位向响应
(a) 8:3 BAQ azimuth response of SAR system



(b) SAR系统8:3 BAQ距离向响应
(b) 8:3 BAQ Range response of SAR system

图 7 系统无线点目标距离向和方位向响应

Fig. 7 Range and azimuth response of wireless system point target

4 结束语

在雷达系统设计中有必要对系统相关参数和系统的应用环境进行模拟仿真,其目的是得到 SAR 系统相关参数的验证和系统成像算法的验证。本文首先分析点目标回波信号模型,给出点目标回波信号的产生和 SAR 回波模拟器的实现,然后对于 HJ-1-C SAR 系统测试,利用回波模拟器,分析构成雷达系统发射、接收闭环测试的方法,给出有线和无线两种闭环测试系统来验证 HJ-1-C SAR 系统的电性能指标。测试结果表明,基于回

波模拟器的 HJ-1-C SAR 闭环测试系统,能够满足 HJ-1-C SAR 系统的测试需要,SAR 系统点目标性能指标符合研制要求,该闭环系统具有很好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 张绪锦,朱兆达,张卫华,等. SAR 回波模拟半实物仿真平台的构建[J]. 现代雷达,2007,29(9):9-12.
Zhang Xujin, Zhu Zhaoda, Zhang Weihua, et al. SAR echo simulation based on hardware-in-loop[J]. Modern Radar, 2007,29(9):9-12.
- [2] 姜祝,韩松. 基于 LabVIEW 的机载 SAR 回波模拟器设计[J]. 电子测量技术,2009,32(7):98-101.
Jiang Zhu, Han Song. Airborne SAR echo simulator based on LabVIEW [J]. Electronic Measurement Technology, 2009,32(7):98-101.
- [3] 岳海霞. 合成孔径雷达回波信号模拟研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所,2005.
Yue Haixia. Study on synthetic aperture radar echo simulation[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [4] 鹿浩,曹宁,胡居荣,等. SAR 扩展场景原始数据混合域仿真方法[J]. 数据采集与处理,2010,25(6):716-721.
Lu Hao, Cao Ning, Hu Jurong, et al. Raw data simulation of SAR extended scenes in hybrid domain[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010,25(6):716-721.
- [5] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京:科学出版社,1989.
Zhang Chengbo. Synthetic aperture radar principle, system analysis and application[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [6] Ian G Cumming, Frank H Wong. 合成孔径雷达成像·算法与实现[M]. 洪文等译. 北京:电子工业出版社,2012.
Ian G Cumming, Frank H Wong. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [7] 陈希信,孙俊,龙伟军. 脉冲多普勒雷达中补零 FFT 与折叠 FFT 的性能比较[J]. 数据采集与处理,2013,28(4):450-453.
Chen Xixin, Sun Jun, Long Weijun. Performance comparison of zero-filled FFT and folded FFT in pulse doppler radar[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013,28(4):450-453.
- [8] Mehrdad Soumekh. Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms[M]. John Wiley & Sons, Inc, Interscience, 1999.

作者简介:张华春(1965-),男,研究员,研究方向:合成孔径雷达系统集成测试与信号处理,E-mail: hczhang@mail. ie. ac. cn;岳海霞(1975-),女,副研究员,研究方向:合成孔径雷达系统集成及信号处理;禹卫东(1969-),男,研究员,博士生导师,研究方向:合成孔径雷达系统及信号处理。