

文章编号: 2095-4980(2019)05-0861-05

基于 PSK 调制信号的无源成像系统模糊函数分析

张磊¹, 碗超凡¹, 刘振星^{2,3}, 尹治平¹

(1.合肥工业大学 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009; 2.中国科学技术大学 信息科学技术学院, 安徽 合肥 230027;
3.中国航天科技集团有限公司, 北京 100048)

摘要: 从双基地成像系统的模糊函数出发, 针对相移键控(PSK)调制信号的特点, 引入平均模糊函数的概念。利用求取期望的方式消除码元序列的随机性对系统模糊函数的影响, 详细推导了基于 PSK 调制信号的无源成像系统的广义模糊函数, 并通过仿真实验分析了信号波形参数对系统分辨性能的影响。结果表明, PSK 调制信号的序列长度和滚降系数对系统分辨性能的影响很小。

关键词: PSK 调制信号; 无源成像系统; 广义模糊函数; 分辨性能

中图分类号: TN958.97

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201905.0861

Generalized ambiguity function analysis for passive imaging systems using PSK modulating signal

ZHANG Lei¹, WAN Chaofan¹, LIU Zhenxing^{2,3}, YIN Zhiping¹

(1.Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China;
2.School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230027, China;
3.China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: The formula of the generalized ambiguity function of passive imaging system using Phase Shift Keying(PSK) modulating signals is derived in detail. Considering the characteristics of signals, the concept of average ambiguity function is introduced to remove the effect of particular sequence of symbols on the ambiguity function. Then the influence of the waveform parameters of the PSK modulating signals on spatial resolution is investigated by numerical simulations. The results indicate that the influence of the length of the symbol sequence and the roll-off factor is very slight.

Keywords: PSK modulating signal; passive imaging system; generalized ambiguity function; resolution capability

基于外辐射源的双基地无源合成孔径雷达(Bistatic Synthetic Aperture Radar, BISAR)成像系统具有良好的抗干扰性、隐蔽性、低成本和丰富的照射源资源, 逐步成为成像领域的研究热点。无源成像系统以广播电台、电视发射塔、广播卫星、导航卫星等为照射源^[1-4], 以地面或机载接收机为接收站, 构成灵活的空间构型, 实现对目标区域的成像探测。相移键控(PSK)调制是数字传输系统中的一种基础调制方式, 广泛用于通信、雷达、导航等领域^[5-7]。当前, 已有大量论文研究了基于 PSK 调制信号的无源成像系统。文献[6-7]利用数字电视广播卫星为照射源, 从波数域的角度理论分析了正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制信号在无源成像系统中的应用, 并进行了仿真和实验。文献[8]从阵列信号处理方式出发, 详细分析了基于 PSK 调制通信信号的雷达成像技术的可行性。此外, 多个国内外研究团队以全球导航卫星作为外辐射源, 理论上分析了无源成像系统的可行性及分辨性能, 并进行了具体实验, 实现了对目标区域的成像观测^[9-11]。

空间分辨力是衡量成像系统性能的重要指标, 对照射源的选择、接收站的位置选择等有着重要的指导作用, 而模糊函数(Ambiguity Function, AF)则广泛用于分析系统的分辨性能。文献[12]研究了不同接收角度下的双基地雷达系统模糊函数图, 并通过模糊函数分析比较了数字电视地面广播信号应用于双基地雷达的性能及目标分辨性能。文献[13]详细推导了 BISAR 系统的广义模糊函数(Generalized Ambiguity Function, GAF), 并以矩形信号和高斯信号作为基带信号模型, 对系统的距离分辨力和方位分辨力进行了详细的分析。文献[14]基于文献[13]的模糊

收稿日期: 2018-01-12; 修回日期: 2018-03-06

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61401140)

函数,详细分析了基于导航信号的多站无源成像系统的模糊函数,定义了 X - Y 平面上的分辨椭圆,随后有团队根据实测的导航信号,比较了多站无源成像系统的分辨椭圆和点扩散函数^[15]。

从公开发表的文献来看,针对基于 PSK 调制信号的无源成像系统的广义模糊函数主要是从矩形信号和高斯信号等简单基带信号模型出发进行推导,没有考虑具体波形对模糊函数的影响。本文针对 PSK 信号的特点,详细推导了基于 PSK 信号波形的双基地无源成像系统的广义模糊函数,分析 PSK 信号的波形参数对 BISAR 成像系统分辨性能的影响。

1 BISAR 系统的信号模型

1.1 系统构型

基于外辐射源的 BISAR 无源成像系统基本构型见图 1,接收机固定在地面,外辐射源到目标区域的距离远远大于接收机到目标的距离。以监测区域的目标点 A 为坐标原点建立坐标系, B 为 A 附近的任意参考点,位置坐标为 $B(x,y,z)$,接收机的位置为 W_R ,外辐射源的位置为 $W_T(u)$,移动速度为 v , u 为方位时间,则由目标点 A 辐射的 PSK 信号的传输距离为:

$$W_A(u) = |A - W_R| + |A - W_T(u)| \quad (1)$$

1.2 回波信号模型

PSK 调制信号利用载波的相位变化来传递数字信息,其表达式为:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} c_n u(t-nT) e^{j(2\pi f_c t + \phi_n)} \quad (2)$$

式中: t 为距离时间; f_c 为雷达载频; c_n 为数字调制信息,在 2PSK 信号中,相位信息取 $0, \pi$,则 c_n 的取值为二进制序列 $[-1, 1]$; N 为序列的长度; $u(t)$ 为脉宽为 T 的矩形脉冲。在信号传输过程中,为了减弱各个码元之间的相互干扰,通常使用 RRC 滤波器产生脉冲信号,滚降系数为 α ,取值范围为 $[0, 1]$ 。此时, $u(t)$ 傅里叶变换后在频域 f 的表达式为:

$$|U(f)|^2 = \begin{cases} T & |f| \leq (1-\alpha)/2T \\ \frac{T}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi T}{\alpha} \left(|f| - \frac{1-\alpha}{2T}\right)\right) \right] & \frac{1-\alpha}{2T} \leq |f| \leq \frac{1+\alpha}{2T} \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

回波信号是经过衰减和延迟的发射信号,在接收机端经过下变频和解调处理后得到预处理信号的表达式为:

$$s_A(t, u) = \sigma s(t - \tau_A) e^{-j2\pi f_c \tau_A} e^{-j2\pi f_d^\Delta (t - \tau_A)} \quad (4)$$

式中: $\tau_A(u)$ 为方位时间 u 时刻的目标回波延时; $f_d^\Delta(u)$ 为 u 时刻的多普勒频移; σ 为目标点散射系数。

2 BISAR 系统的广义模糊函数

由文献[9]可知,双基地 SAR 成像系统的广义模糊函数为:

$$\chi(A, B) = \iint s_A(t, u) s_B^*(t, u) dt du \quad (5)$$

与一般雷达不同,无源雷达接收的信号通常是非合作信号,即系统接收到的 PSK 信号的码元序列可能是未知的。为了消除码元序列随机性对模糊函数的影响,使结果具有一般性,根据 Cooper 对随机信号的平均模糊函数的定义,对式(5)进行处理得到:

$$A(\mathbf{r}) = E \left\{ |\chi(A, B)|^2 \right\} = E \left\{ \left| \iint s_A(t, u) s_B^*(t, u) dt du \right|^2 \right\} \quad (6)$$

目标点 A 为坐标原点, B 为 A 附近任意参考点,则目标点到参考点的距离矢量为 \mathbf{r} 。将回波信号的表达式代入式(6)中,对 t 进行傅里叶变换,近似处理后得到广义模糊函数在频域上的表达式为:

$$A(\mathbf{r}) = \frac{\sigma^4}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n'=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{k'=0}^{N-1} E \left\{ c_n c_{n'}^* c_k c_{k'}^* \right\} \times \iint U(f) U^*(f) e^{j2\pi f(\tau_B - \tau_A)} e^{j2\pi f_c(\tau_B - \tau_A)} e^{-j2\pi(f_d^B \tau_B - f_d^\Delta \tau_A)} df du \times \left(\iint U(f) U^*(f) e^{j2\pi f(\tau_B - \tau_A)} e^{j2\pi f_c(\tau_B - \tau_A)} e^{-j2\pi(f_d^B \tau_B - f_d^\Delta \tau_A)} df du \right)^* \quad (7)$$

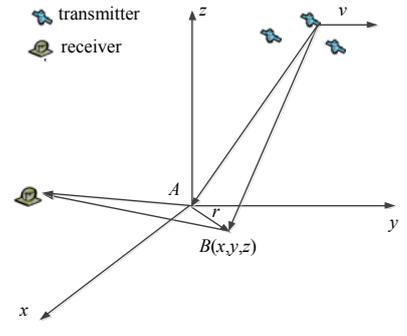


Fig.1 Geometry of passive imaging system
图 1 无源成像系统构型

在 PSK 调制信号中, 码元之间是相互独立的, 因此

$$E\{c_n c_n^* c_k c_k^*\} = \begin{cases} 1 & n = n', k = k'; \\ 1 & n = k, n' = k', n \neq n'; \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (8)$$

在目标点与参考点之间距离远远小于目标点与发射机之间距离的条件下, 近似有

$$W_B(u) = |r - W_R| + |W_T(u)| - i_T^A(u)r \quad (9)$$

式中 i_T^A 为目标点 A 到发射机方向的单位向量。

τ_A, τ_B 各为目标点和参考点的回波延时, c 为信号传输速度, 则两点的回波延时差为:

$$\tau_d(u) = \tau_B - \tau_A = -\frac{i_T^A(u)r}{c} + \frac{|r - W_R| - |W_R|}{c} \quad (10)$$

假设双基地 SAR 的成像累计时间为 T_0 , 则 u 的取值范围为 $[-T_0/2, T_0/2]$ 。将式(10)在 $u=0$ 处泰勒展开, 得

$$\tau_d(u) = -\frac{i_T^A(0)r}{c} + \frac{|r - W_R| - |W_R|}{c} + \frac{r}{c} \times \frac{d(-i_T^A(0))}{du} u \quad (11)$$

同理, 将 $f_d^B \tau_B - f_d^A \tau_A$ 在 $u=0$ 处泰勒展开, 得

$$f_d^B \tau_B - f_d^A \tau_A = \frac{f_c v r}{c^2} + \frac{f_c v (-i_T^A(0))}{c^2} (|r - W_R| - |W_R|) + \frac{v r (|r - W_R| - |W_R|)}{c |r|^2} f_c \times \frac{r}{c} \times \frac{d(-i_T^A(0))}{du} u \quad (12)$$

综合上述分析, 并令

$$\tau_d = -\frac{i_T^A(0)r}{c} + \frac{|r - W_R| - |W_R|}{c}, \quad f_d = f_c \times \frac{r}{c} \times \frac{d(-i_T^A(0))}{du} \quad (13)$$

则基于 PSK 调制信号的 BISAR 系统的广义模糊函数为:

$$A(r) = \sigma^4 \left| \int e^{j2\pi f_d (1 - \frac{v r (|r - W_R| - |W_R|)}{c |r|^2}) u} du \right|^2 \times \left(\left| \int |U(f)|^2 e^{j2\pi f \tau_d} df \right|^2 + \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0, k \neq n}^{N-1} \left| \int |U(f)|^2 e^{j2\pi f (\tau_d + (k-n)T)} df \right|^2 \right) \quad (14)$$

式(14)为基于 PSK 信号的双基地 SAR 的广义模糊函数与目标点到参考点之间距离的关系式。从中可以看出, 接收 PSK 信号的码元序列的长度 N 、矩形脉冲的宽度 T 和频谱 $U(f)$ 均是影响系统的模糊函数的参数。下一节将以 GPS 信号为例, 通过仿真分析 PSK 信号波形参数对系统模糊函数和分辨性能的影响。

3 实验仿真

GPS 卫星的发射信号是典型的 PSK 调制信号, 选取某一时刻合肥上空信号比较强的 GPS 卫星作为系统的外辐射源, 其基本参量和空间参数如表 1 所示。为简化分析, 假设在成像累计时间内卫星的运动沿直线匀速运动, 与地面固定的接收机构成双基地成像系统, 选取 x - y 平面上 A 附近的任意点 B (见图 1), 并根据式(14)计算成像系统的广义模糊函数。

不同的 GPS 信号使用不同的伪随机码序列进行 BPSK 调制, 通过式(14)计算的模糊函数能够在不考虑具体伪随机码的条件下衡量系统的分辨性能, 使得推导结果具有一般性。GPS 信号的码元长度 N 为 1 023, 设定 RRC 滤波器的滚降系数 α 为 0.22, 则基于 GPS 信号的双基地 SAR 系统的模糊函数如图 2 所示。脉冲时宽与信号的带宽直接相关, 而信号带宽是决定系统分辨性能的直接因素, 文献[9-10]已开展过充分讨论, 在此不再分析, 本文主要分析码元长度 N 和滚降系数 α 对系统模糊函数的影响。

3.1 码元序列长度对模糊函数的影响

从模糊函数的公式可以看出, PSK 信号的码元序列长度 N 是影响系统模糊函数的因素之一。以基于 GPS 卫

表 1 GPS 卫星基本参数

Table 1 Fundamental parameters of GPS satellite		
parameter	symbol	numerical value
carrier frequency	f_c /MHz	1 575.42
bandwidth of signal	B / MHz	1.023
width of pulse	T /s	$(1/1.023) \times 10^{-6}$
integration time	T_0 /s	60
velocity of satellite	v (m/s)	$(1.096 2, -0.636 6, -0.755 2) \times 10^4$
initial position of satellite	W_0	$(0.447 08, 20.227 8, 1.618 34) \times 10^5$

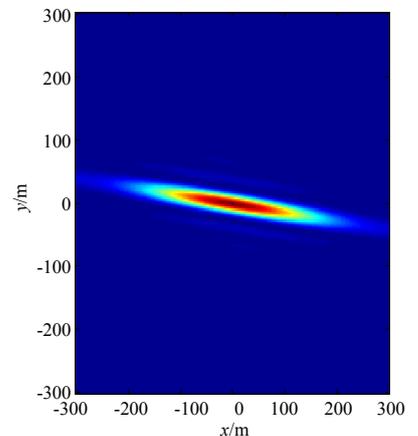


Fig.2 GAF of system based on GPS signal
图 2 基于 GPS 信号的系统模糊函数图

星的 BISAR 系统为基础, 设定序列的长度为 21,101,401,1 001, 分别计算系统的模糊函数, 并沿分辨椭圆的长轴和短轴做剖面, 画出模糊函数在这 2 个方向上的变化趋势, 如图 3 和图 4 所示。其中, 滚降系数 α 为 0.22。

从图 3、图 4 可以看出, 基于不同长度序列的系统模糊函数基本相同。系统的分辨力主要通过主瓣的 -3 dB 宽度计算得到, 码元序列的长度主要影响模糊函数的旁瓣, 随着序列长度的增加, 模糊函数的旁瓣越来越小。因此可以得出, PSK 信号的码元序列长度对系统的分辨性能没有影响, 但可以抑制旁瓣。

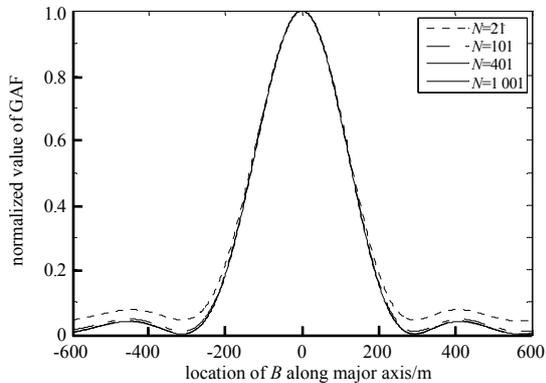


Fig.3 GAF of BISAR along major axis
图 3 模糊函数在长轴方向变化趋势图

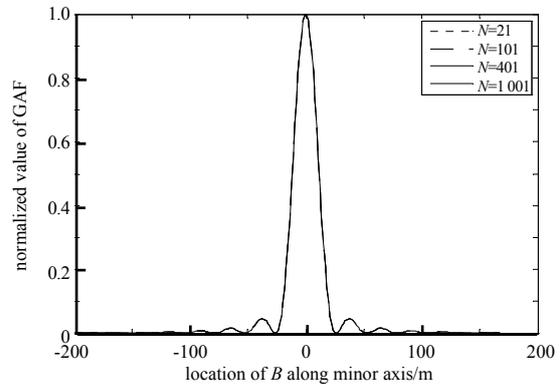


Fig.4 GAF of BISAR along minor axis
图 4 模糊函数在短轴方向变化趋势图

3.2 滚降系数对模糊函数的影响

使用 RRC 滤波器生成 PSK 信号中的矩形脉冲时, 滚降系数是要考虑的主要参数之一。根据式(3)可知, 滚降系数对矩形脉冲的频谱密度有一定的影响, 进而影响到系统的模糊函数。因此, 选择不同的 α , 分析其对系统的模糊函数的影响。滚降系数的取值为 0.2,0.4,0.6,0.8, 码元序列长度为 1 001。

图 5、图 6 分别为基于不同滚降系数的模糊函数在长轴和短轴方向上的变化趋势图。从图中可以看出, 滚降系数主要影响系统在分辨椭圆长轴方向上的分辨性能。当滚降系数增大时, 长轴方向上的模糊函数主瓣逐渐变窄, 系统的分辨性能有一定的提高。当码元宽度固定时, 滚降系数越大, 信号所占带宽就越大, 系统分辨力也越高。从图 5 可见, 当滚降系数 α 从 0.2 变化至 0.8 时, 长轴方向的模糊函数主瓣的 -3 dB 宽度降低了 33.2 m, 系统在长轴方向上的分辨能力提高了 12.4%。

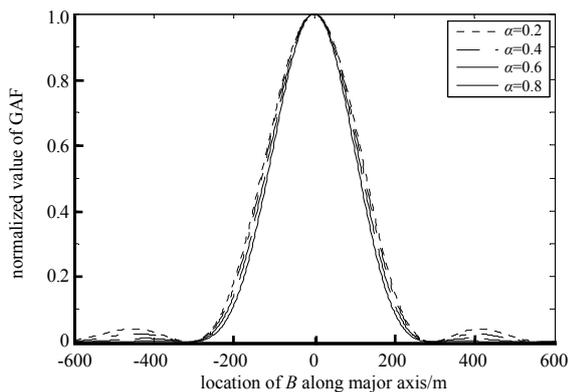


Fig.5 GAF of BISAR along major axis
图 5 模糊函数在长轴方向变化趋势图

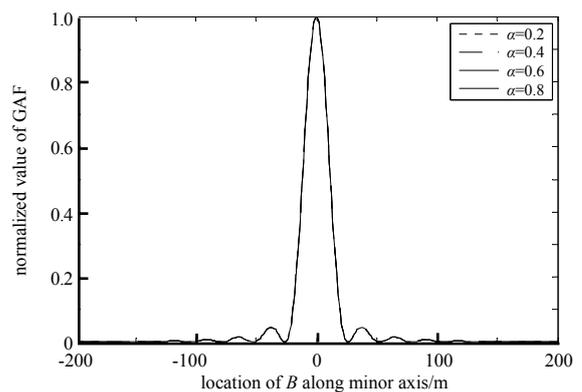


Fig.6 GAF of BISAR along minor axis
图 6 模糊函数在短轴方向变化趋势图

4 结论

本文研究了基于 PSK 调制信号的无源成像系统的广义模糊函数, 从平均模糊函数的概念出发, 提出了适用于 PSK 调制信号的模糊函数的计算方法, 并通过仿真分析了 PSK 调制信号波形参数对系统分辨性能的影响。文中推导的广义模糊函数能够消除码元序列的随机性对模糊函数的影响, 具有较强的普适性, 可作为分析评价基于 PSK 信号的无源成像系统分辨性能的有利工具, 为无源成像系统的分辨性能的研究提供了一条新途径。

参考文献:

- [1] PRATI C, ROCCA F, GIANCOLA D, et al. Passive geosynchronous SAR system reusing backscattered digital audio broadcasting signals[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002,36(6):1973–1976. DOI:10.1109/36.729370.
- [2] WANG J, ZHANG X, BAO Z. Passive radar imaging algorithm based on subapertures synthesis of multiple television stations[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007,29(3):1–4. DOI:10.1109/ICR.2006.343138.
- [3] WEI Q, ELISA G, ALESSIO B, et al. Compressive sensing-based algorithm for passive bistatic ISAR with DVB-T signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015,51(3):2166–2180. DOI:10.1109/TAES.2015.130761.
- [4] GROMEK D, KULPA K, SAMCZYNSKI P. Experimental results of passive SAR imaging using DVB-T illuminators of opportunity[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2016,13(8):1124–1128. DOI:10.1109/LGRS.2016.2571901.
- [5] 裴立业, 江桦. 卫星常用调相信号自动调制识别算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(6):964–969. (PEI Liye, JIANG Hua. Automatic recognition for the satellite phase modulated signals[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(6):964–969.) DOI:10.11805/TKYDA201306.0964.
- [6] LIU Changchang, WANG Tianyun, DING Li, et al. Sparse imaging for passive radar system based on digital video broadcasting satellites[C]// 2012 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Huangshan, China: [s.n.], 2013:1–5. DOI:10.1109/WCSP.2012.6542997.
- [7] SUN Zeyue, WANG Tianyun, JIANG Tao, et al. Analysis of the properties of DVB-S signal for passive radar application[C]// 2013 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Hangzhou, China: [s.n.], 2013:1–5. DOI:10.1109/WCSP.2013.6677172.
- [8] STURM C, SCHULTEIS S, WIESBECK W. Two-dimensional radar imaging with scattered PSK-modulated communication signals[C]// 2007 European Radar Conference. Munich, Germany: [s.n.], 2007:134–137. DOI:10.1109/EURAD.2007.4404955.
- [9] LIU F, ANTONIOU M, ZENG Z, et al. Coherent change detection using passive GNSS-based BSAR: experimental proof of concept[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013,51(8):4544–4555. DOI:10.1109/TGRS.2012.2231082.
- [10] 田卫明, 曾涛, 胡程. 基于导航信号的 BiSAR 成像技术[J]. 雷达学报, 2013,2(1):39–45. (TIAN Weiming, ZENG Tao, HU Cheng. Imaging algorithm for bistatic SAR based on GNSS signal[J]. Journal of Radars, 2013,2(1):39–45.) DOI:10.3724/SP.J.1300.2013.20092.
- [11] 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 Xuezheng, LIU Feifeng, ZHANG Tian, et al. Large scene imaging of BiSAR using BeiDou navigation satellite system[J]. Journal of Signal Processing, 2017,33(4):546–550.) DOI:10.16798/j.issn.1003–0530.2017.04.014.
- [12] 袁春姗, 郭骏, 唐济远. DTTB 的双基地雷达模糊函数及目标分辨力分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(5):741–746. (YUAN Chunshan, GUO Jun, TANG Jiyuan. Analysis of ambiguity function and performance of target resolution of DTTB signal in bistatic radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(5):741–746.) DOI:10.11805/TKYDA201305.0741.
- [13] ZENG T, CHERNIAKOV M, LONG T. Generalized approach to resolution analysis in BSAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2005,41(2):461–474. DOI:10.1109/TAES.2005.1468741.
- [14] DAOUT F, SCHMITT F, GINOLHAC G, et al. Multistatic and multiple frequency imaging resolution analysis—application to GPS-based multistatic radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2013,48(4):3042–3057. DOI:10.1109/TAES.2012.6324676.
- [15] SANTI F, ANTONIOU M, PASTINA D. Point spread function analysis for GNSS-based multistatic SAR[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2015,12(2):304–308. DOI:10.1109/LGRS.2014.2337054.

作者简介:



张磊(1993–), 男, 安徽省阜阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为信号检测与处理. email:l_zhang_7@mail.hfut.edu.cn.

碗超凡(1993–), 男, 河南省安阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波技术与天线.

刘振星(1982–), 男, 湖南省岳阳市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为遥感卫星综合电子系统技术.

尹治平(1980–), 男, 湖南省常宁市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为雷达与微波成像.