

多载频 MIMO-SAR 对消处理抗欺骗干扰

李云涛¹, 陈永光^{1,2}, 贾 鑫¹, 邓云凯³, 尹灿斌¹

(1. 装备学院光电装备系, 北京 101416; 2. 军械工程学院, 河北石家庄 050003; 3. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

摘 要: 根据多发多收合成孔径雷达(MIMO-SAR)的特点, 提出在重叠等效相位中心(EPC)处采用对消处理抑制欺骗干扰的方法. MIMO-SAR 采用收发同置天线配置可形成多组位置相同的等效相位中心; 发射多载频线性调频(LFM)信号将使每组位置重叠等效相位中心处的回波相位有所差异. 利用此特点, 可以在子回波相位补偿后采用对消处理对欺骗干扰进行抑制. 文中给出了收发同置 MIMO-SAR 的系统模型, 分析了欺骗干扰下的回波特点, 指出在位置重叠等效相位中心处的欺骗干扰信号对间仅存在相位差异, 给出了对消处理完成欺骗干扰抑制的信号流程, 实验结果证明了本文方法的有效性.

关键词: 多发多收合成孔径雷达; 抗干扰; 等效相位中心; 对消处理

中图分类号: TN974 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)09-1790-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.014

Multi-Frequency MIMO-SAR Cancellation for Anti-Deception Jamming

LI Yun-tao¹, CHEN Yong-guang^{1,2}, JIA Xin¹, DENG Yun-kai³, YIN Can-bin¹

(1. Dept. of Optical and Electrical Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China;

2. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

3. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A new cancellation method processed at the superposition of equivalent phase center (EPC) is proposed to suppress deception jamming against multiple-input multiple-output synthetic aperture radar (MIMO-SAR). MIMO-SAR employs co-located antennas in azimuth direction and transmits multiple linear frequency modulation (LFM) signals with step carrier frequency to form crossed EPC, where the echo pairs have the equal delay and different carrier phase. The deception jamming can be eliminated by cancellation processing at each superposition of EPC. Geometry model of MIMO-SAR with co-located antennas is given. The radar echo with deception jamming is analyzed. The difference between deception jamming signal pair at each superposition of EPC and cancellation procedure are discussed. The simulation experiments are performed to validate the proposed method.

Key words: multi-input multi-output synthetic aperture radar (MIMO-SAR); anti-jamming; equivalent phase center (EPC); cancellation processing

1 引言

SAR 在军事领域发挥着日益重要的作用, SAR 干扰与抗干扰技术的研究也引起了雷达界的广泛关注. 然而, SAR 采用相干处理体制, 故而对 SAR 实施常规噪声压制干扰需要的功率很大、代价很高^[1]. 随着现代微波技术、数字射频存储技术以及微电了等技术的快速发展, SAR 有源假目标干扰以其极高的性价比而备受青睐^[2].

SAR 有源假目标干扰系统能够以灵活多变的方式自主转发雷达信号, 它能高效地达到欺骗或甚至压制等

目的, 这促使研究如何有效对抗有源假目标干扰的任务提上了日程^[3~7]. 文献[3]提出利用脉冲随机相位波形调制技术来对抗有源假目标干扰, 并提出一种称为“惩罚函数”的方法实现对有源假目标干扰抑制. 该方法实质上属于脉冲捷变体制的抗干扰方法, 要求在发射信号带宽不变的前提下, 对每个发射信号波形都要进行不同的调制操作, 增加了信号调制和收发的难度, 同时也大大增加了成像处理的复杂性, 在现阶段实施起来有相当难度. 文献[4]介绍了用双路对消抑制弹射式干扰的原理及结果, 从理论上分析了双路对消的工作原理, 并用模拟数据进行成像处理对双路对消作了仿真实验, 但该

方法要求双天线间距满足特定条件.在分时极化测量条件下,文献[5]提出了在多普勒域相位补偿实现极化 SAR 有源假目标干扰的鉴别和对消新方法,给出了一种能对抗有源假目标干扰的极化 SAR 成像方案,并进行了实测和仿真实验验证.利用双通道极化 SAR 中真假目标回波的差异,文献[6]同样利用相位补偿完成了通道对消抗欺骗干扰的目的.相比于未干扰的全极化成像结果,极化对消方法将损失一部分极化信息,不利于目标识别、分类等应用.根据欺骗干扰回波和真实目标回波方向不同的原理,利用距离向多孔径,对接收回波使用距离向数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF)技术,通过谱估计得到欺骗干扰方向,然后计算加权系数,在干扰方向形成零陷,实现空域滤波,从而达到抗欺骗干扰的目的^[7],但此方法对于虚假场景干扰进行抑制时,要求系统有足够高的自由度和角分辨率精度,天线设计难度较大,系统复杂度较高.

MIMO-SAR 系统使用多个孔径同时发射信号,多个孔径接收回波,显著增强了地面信息获取能力,是当前 SAR 领域研究的热点^[8~10],而其抗干扰方法的相关研究,目前还未见报道.本文针对 MIMO-SAR 的结构和信号特点,提出利用收发同置天线发射多载频 LFM 信号配置,通过位置重叠 EPC 处的信号对消处理抑制有源欺骗干扰.

2 收发同置 MIMO-SAR 系统模型

为分析方便,MIMO-SAR 系统采用线性阵列天线.存在干扰条件下,MIMO-SAR 成像几何关系如图 1 所示.线性阵列天线沿航迹方向布设,高度为 H_s ,收发阵元同置,相邻阵元间距用 d_{ant} 表示,平台以速度 v_a 匀速飞行.以成像场景中心为原点建立直角坐标系,沿航迹方向设为 X 轴,高度向为 Z 轴.MIMO-SAR 天线中第 k 个阵元的初始位置为 $((k-1)d_{ant}, 0, H_s)$, $k=1, 2, \dots, K$, K 为阵元总数.场景中任意散射点 p 的坐标为 $(x_p, y_p, 0)$,其与天线阵元 k 的距离用 R_{kp} 表示.干扰机位于地面 $(x_i, y_i, 0)$ 处,与天线阵元 k 的距离为 R_{ki} , R_{j0} 为干扰机与雷达平台的最短斜距.

收发同置 MIMO-SAR 在一个脉冲重复周期内可以形成若干个位置相同的 EPC.这样虽然不满足最大 EPC 的要求,但多载频 MIMO-SAR 却可以在这种配置下实现子带合

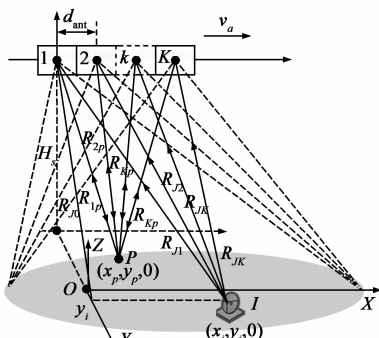


图1 干扰条件下MIMO-SAR 成像几何关系

成,从而达到提高距离分辨率的目的,另外,合成后的信号载频相同,有利于方位压缩成像.

设阵元 k 发射的基带信号为 $q_k(t)$,则阵元 n 接收到的点目标 p 的基带回波为

$$r_n(\tau, t_m) = \sigma_p \sum_{k=1}^K \text{rect}\left(\frac{\tau - \frac{R_{kp} + R_{np}}{c}}{T_r}\right) \cdot q_k\left(\tau - \frac{R_{kp} + R_{np}}{c}\right) \exp\left(-j2\pi f_c \frac{R_{kp} + R_{np}}{c}\right) \quad (1)$$

式中 $n=1, 2, \dots, K$; σ_p 为点目标 p 的反射系数; T_r 为脉冲带宽; f_c 为发射信号载频.

干扰机对截获的雷达信号进行相应的调制可形成欺骗干扰,干扰机的传输函数为 $h(\tau, t_m)$,则阵元 n 接收到的干扰信号为

$$J_n(\tau, t_m) = \sigma_I \left[\sum_{k=1}^K \text{rect}\left(\frac{\tau - \frac{R_{jk} + R_{jn}}{c}}{T_r}\right) q_k\left(\tau - \frac{R_{jk} + R_{jn}}{c}\right) \right] * h(\tau, t_m) \exp\left(-j2\pi f_c \frac{R_{jk} + R_{jn}}{c}\right) \quad (2)$$

式中 σ_I 为干扰机的散射系数; $*$ 为卷积符号.阵元 n 接收到的总回波信号可表示为

$$s_n(\tau, t_m) = r_n(\tau, t_m) + J_n(\tau, t_m) = \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sigma_p \cdot \text{rect}\left(\frac{\tau - \frac{R_{kp} + R_{np}}{c}}{T_r}\right) q_k\left(\tau - \frac{R_{kp} + R_{np}}{c}\right) \exp\left(-j2\pi f_c \frac{R_{kp} + R_{np}}{c}\right) + \sigma_I \left[\sum_{k=1}^K \text{rect}\left(\frac{\tau - \frac{R_{jk} + R_{jn}}{c}}{T_r}\right) q_k\left(\tau - \frac{R_{jk} + R_{jn}}{c}\right) \right] * h(\tau, t_m) \exp\left(-j2\pi f_c \frac{R_{jk} + R_{jn}}{c}\right) \quad (3)$$

式中 P 表示成像场景中散射点的总数目.

3 收发同置多载频 MIMO-SAR 欺骗干扰抑制

通过图像分辨率分析、边缘和阴影检测等方法,判图员可以很快判断系统是否受到欺骗干扰.对于多载频 MIMO-SAR 系统,当欺骗干扰机发挥效能时,其将截获的雷达信号经相关调制后转发回雷达接收阵元,雷达系统对所录取的信号进行回波分离后,欺骗干扰信号与真实目标回波的 EPC 位置是一致的.在其中位置相同的 EPC 处,干扰信号的延迟相同,利用这一特点,采用对消方式就能完成欺骗干扰的抑制.

3.1 对消处理信号流程

对于多载频 MIMO-SAR 系统,其发射载频步进的 LFM 信号,通道 k 的发射信号可表示为

$$s_k(t) = \exp\{j2\pi f_c t + j\pi K_r \tau^2\} \quad (4)$$

式中 $f_k = f_c + (k-1)B_r$; B_r 为信号带宽; K_r 为调频斜率.

欺骗干扰条件下,各阵元接收回波经相关解调和低通滤波后可完成回波分离,不考虑包络变化影响时,分离后的子信号 $s_{kn}(\tau, t_m)$ 为

$$s_{kn}(\tau, t_m) = \sum_{p=1}^P \sigma_p \exp\left(-j2\pi \frac{R_{kp} + R_{np}}{\lambda_k}\right) \cdot \exp\left\{j\pi K_r \left(\tau - \frac{R_{kp} + R_{np}}{c}\right)^2\right\} + \sigma_l \left\{ \exp\left[j\pi K_r \left(\tau - \frac{R_{jk} + R_{jn}}{c}\right)^2\right] * h(\tau, t_m) \right\} \cdot \exp\left(-j2\pi f_k \frac{R_{jk} + R_{jn}}{c}\right) \quad (5)$$

式中 $s_{kn}(\tau, t_m)$ 表示阵元 k 发射,阵元 n 接收的子回波信号.

同理,阵元 n 发射,阵元 k 接收的子回波信号可写为

$$s_{nk}(\tau, t_m) = \sum_{p=1}^P \sigma_p \exp\left(-j2\pi \frac{R_{np} + R_{kp}}{\lambda_n}\right) \cdot \exp\left\{j\pi K_r \left(\tau - \frac{R_{np} + R_{kp}}{c}\right)^2\right\} + \sigma_l \left\{ \exp\left[j\pi K_r \left(\tau - \frac{R_{jn} + R_{jk}}{c}\right)^2\right] * h(\tau, t_m) \right\} \cdot \exp\left(-j2\pi f_n \frac{R_{jn} + R_{jk}}{c}\right) \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可见,当 $k \neq n$ 时,由于发射信号的载频不同,两子回波中干扰分量的相位存在一定差异,而其基带延迟和调制相同,若已知干扰机初始位置,则可根据干扰机与 MIMO-SAR

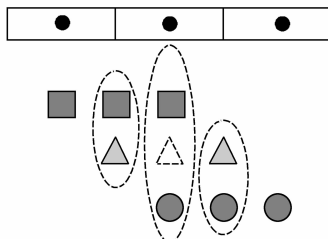


图2 三通道MIMO-SAR可对消EPC位置示意图

天线阵元的实时距离信息,通过对收发互易的两子回波进行相位补偿,然后采用对消方式实现欺骗干扰的有效抑制.三通道 MIMO-SAR 系统中可利用的对消 EPC 位置如图 2 中椭圆虚线标注所示.

由前述分析可知,相位补偿因子的表达式为

$$\Theta(t_m) = \exp\left\{j2\pi f_{\Delta nk} \frac{R_{jk} + R_{jn}}{c}\right\} \quad (7)$$

式中 $f_{\Delta nk} = f_n - f_k$. 由式(7)可见,完成相位补偿需要实时地干扰机与雷达间的距离信息,而干扰机的定位问题是一个难点,可采用的方法有:干扰图分析、采用迭代算法估计干扰信号相位误差^[4]、视线追踪算法和切线补偿算法等.对于 MIMO-SAR 系统,还可以利用其充足的等效相位中心,提高干扰机定位精度.

将式(7)与式(6)相乘,然后和式(5)作对消处理可得 $\Delta s(\tau, t_m) = s_{kn}(\tau, t_m) - s_{nk}(\tau, t_m)\Theta(t_m)$

$$\Delta s(\tau, t_m) = \sum_{p=1}^P \sigma_p \exp\left(-j2\pi f_k \frac{R_{kp} + R_{np}}{c}\right) \cdot \exp\left\{j\pi K_r \left(\tau - \frac{R_{kp} + R_{np}}{c}\right)^2\right\} - \sum_{p=1}^P \sigma_p \exp\left\{j\pi K_r \left(\tau - \frac{R_{np} + R_{kp}}{c}\right)^2\right\} \cdot \exp\left(-j2\pi f_n \frac{R_{np} + R_{kp}}{c}\right) \cdot \exp\left\{j2\pi f_{\Delta nk} \frac{R_{jk} + R_{jn}}{c}\right\} \quad (8)$$

由式(8)可见,经对消处理后,欺骗干扰信号完全消除.

3.2 对消处理对图像的影响

对消处理后,场景中点目标 p 的回波信号为

$$\Delta s_p(\tau, t_m) = \sigma_p \exp\left(-j2\pi f_k \frac{R_{kp} + R_{np}}{c}\right) \exp\left\{j\pi K_r \left(\tau - \frac{R_{kp} + R_{np}}{c}\right)^2\right\} \cdot \left[1 - \exp\left(j2\pi f_{\Delta nk} \frac{R_{jk} + R_{jn} - R_{kp} - R_{np}}{c}\right)\right] \quad (9)$$

当下式成立时,散射点 p 处的回波将被完全抑制.

$$f_{\Delta nk} \frac{R_{jk} + R_{jn} - R_{kp} - R_{np}}{c} = M \quad (10)$$

而当下式成立时, p 点处的回波能量加倍.

$$f_{\Delta nk} \frac{R_{jk} + R_{jn} - R_{kp} - R_{np}}{c} = M + \frac{1}{2} \quad (11)$$

式中 M 为任意整数.

当干扰机位于成像场景中时,在干扰机处存在距离关系: $R_{nj} + R_{kj} = R_{jn} + R_{jk}$,即经过对消处理后,干扰机处的回波将被完全消除.

由上述分析可知,干扰抑制后的图像将会有明暗条纹出现,其间隔不但与距离差有关,同时也与两信号的载频差相关,而对于 K 个收发同置阵元配置的 MIMO-SAR 系统,有 $K \times (K-1)/2$ 个位置相同的 EPC,因此可以将这些对消后的图像集综合利用,通过图像融合技术消除明暗条纹的影响.

4 抗欺骗干扰仿真实验

4.1 试验条件

本文采用方位三通道收发同置多载频 MIMO-SAR 仿真数据验证抗欺骗干扰对消处理方法,仿真中采用的系统参数如表 1 所示.

由表 1 中的

表 1 收发同置多载频 MIMO-SAR 系统参数

参数	符号	数值
卫星高度	H_s	514.8km
发射信号载频	f_c	9.65GHz
发射信号带宽	B_r	30MHz
发射信号时宽	T_r	5 μ s
天线俯仰尺寸	h_{ant}	0.886m
子孔径方位尺寸	d_{ant}	4m
天线方位孔径	N_{az}	3
多普勒带宽	B_d	1774Hz
干信比	JSR	-10dB
虚假图像场景		金字塔模板

系统参数可推导出 MIMO-SAR 的工作波长为 0.031m, 卫星平台的运动速度为 7.6km/s. 为节省计算开销, 仿真场景中设为 $0.7\text{km} \times 0.7\text{km}$, 目标场景如图 3 所示.

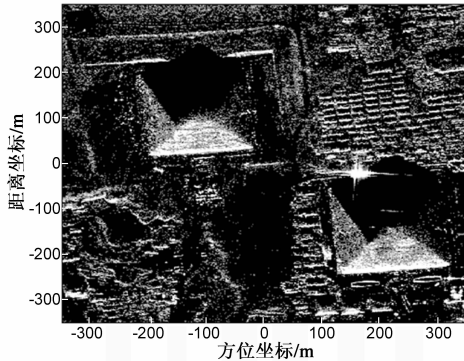


图3 成像场景

4.2 实验结果与分析

图 4 为无欺骗干扰下采用滤波器组法解多普勒模糊、子带拼接技术实现宽带合成的多载频 MIMO-SAR 成像结果, 图 5 为受欺骗干扰的 MIMO-SAR 成像结果, 金字塔虚假图像区域已在图中用矩形框标出, 图 6 为三组重叠 EPC 处回波对采用对消处理和图像融合后的干扰抑制图像.

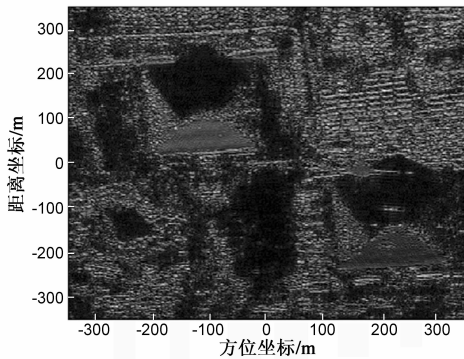


图4 无干扰时的MIMO-SAR图像

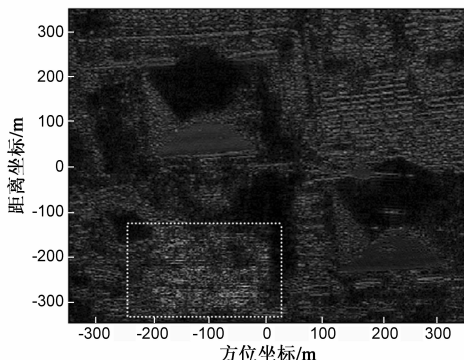


图5 欺骗干扰下的MIMO-SAR图像

由图 4 可见, 收发同置多载频 MIMO-SAR 采用子带合成技术可实现高分辨率成像. 图 5 中为虚假图像干扰结果, 由图可见, 在精确侦查的前提下, 干扰机可对 MIMO-SAR 形成有效的虚假场景欺骗干扰. 从图 6 中可以

看到, 采用对消处理方法能有效地进行欺骗干扰抑制, 但由于仅利用了子回波信息, 最终的图像分辨率将变差, 这与理论分析是一致的.

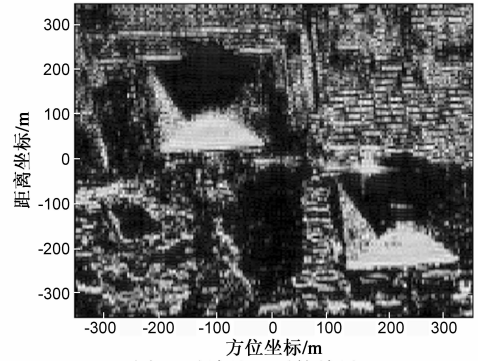


图6 对消处理后的结果

5 结论

本文讨论了 MIMO-SAR 抗欺骗干扰的方法. 利用收发同置天线配置, 多载频 MIMO-SAR 可形成多组位置相同, 而载频不同的 EPC. 首先对每组位置相同 EPC 处的子回波进行相位补偿, 然后通过对消处理可实现欺骗干扰的抑制. 文中给出了收发同置多载频 MIMO-SAR 抗欺骗干扰处理流程, 并对干扰抑制后对图像的影响进行了理论分析, 仿真实验结果验证了该方法的正确性.

多通道 SAR 可以利用目标与干扰在空间位置上的不同消除干扰, 其主要实现方式为 DBF-SAR 系统, 但存在一些问题, 比如(1)需要较为复杂的天线系统, 以提供充足的自由度;(2)进行空间谱估计, 增大了计算量, 且受噪声影响, 谱估计精度不高;(3)当干扰机距离向位置与虚假目标距离向位置相隔较近时, 抗干扰效果会下降. 另外, 由于平台的运动偏差、姿态误差, 以及各种因素的影响, 难以在干扰方向形成精确的零陷. 而本文所述方法利用 MIMO-SAR 系统自身结构特点, 对子回波进行相位补偿然后对消处理. 与 DBF 零点指向技术相比, 该方法具有受噪声影响较小、运算效率较高、实现容易、可靠性和稳健性较强等优点.

相位补偿精度直接影响对消处理的效果, 而干扰源的精确定位是相位补偿的关键, 因此, 利用 MIMO-SAR 系统提高干扰源的定位精度是进一步研究的方向.

参考文献

- [1] Goj W. Synthetic Aperture Radar and Electronic Warfare[M]. Boston: Artech House Inc, 1993.
- [2] Pace PE, Fouts DJ, Zulaica DP. Digital image synthesizers: are enemy sensors really seeing what's there? [J]. IEEE AES Magazine, 2006, 21(2): 3-7.
- [3] Soumekh M. SAR-ECCM using phase-perturbed LFM chirp

- signals and DRFM repeat jammer penalization[J]. IEEE Trans on AES, 2006, 42(1): 191 - 205.
- [4] 甘荣兵, 王建国, 何川. 双路对消抑制对合成孔径雷达的弹射式干扰[J]. 信号处理, 2005, 21(1): 27 - 30.
GAN Rong-bing, WANG Jian-guo, HE Chuan. Rebound jamming suppression by two-channel SAR[J]. Signal Processing, 2005, 21(1): 27 - 30. (in Chinese)
- [5] 代大海, 王雪松, 肖顺平, 等. PolSAR 有源假目标干扰的鉴别与对消[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1779 - 1783.
DAI Da-hai, WANG Xue-song, XIAO Shun-ping, et al. Discrimination and suppression of active-decoys jamming in PolSAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(9): 1779 - 1783. (in Chinese)
- [6] 郭睿, 孙光才, 周峰, 等. 双通道极化 SAR 干扰抑制[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(6): 1343 - 1349.
GUO Rui, SUN Guang-cai, ZHOU Feng, et al. Jamming suppressing in D-PolSAR system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 2830 - 2835. (in Chinese)
- [7] 齐维孔, 禹卫东. 距离向 DBF-SAR 系统抗欺骗干扰研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2830 - 2835.
QI Wei-kong, YU Wei-dong. Research on countering deceptive jamming with range DBF-SAR system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 2830 - 2835. (in Chinese)
- [8] 齐维孔, 禹卫东, 祁海明. 星载 MIMO-SAR 与距离向 DBF 相结合系统研究[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2251 - 2257.
QI Wei-kong, YU Wei-dong, QI Hai-ming. Study of the system combining spaceborne MIMO-SAR and elevation DBF[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 2251 - 2257. (in Chinese)
- [9] 王力宝, 许稼, 皇甫堪. MIMO-SAR 等效相位中心误差分析与补偿[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2688 - 2693.
WANG Li-bao, XU Jia, HUANGPU Kan. Analysis and compensation of equivalent phase center error in MIMO-SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2688 - 2693. (in Chinese)
- [10] 武其松, 邢孟道, 刘保昌, 等. 面阵 MIMO-SAR 大测绘带成像[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 817 - 824.
WU Qi-song, XING Meng-dao, LIU Bao-chang, et al. Wide swath imaging with the plane-array MIMO-SAR System[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 817 - 824. (in Chinese)

作者简介



李云涛(通信作者) 男, 1984年10月出生
于安徽涡阳. 2006年、2009年于中国人民解放军
装备指挥技术学院获得工学学士和工学硕士学位.
现为装备学院博士研究生. 从事空间信息对抗
和新体制合成孔径雷达技术研究.
E-mail: 03137002@163.com



陈永光 男, 1962年2月生于安徽省合肥市.
总工程师, 研究员, 博士生导师, 享受政府特
殊津贴. 1995年获国防科技大学信息与通信专
业工学学士学位, 共出版专(译)著三部, 发表学
术论文150余篇, 其中30多篇次被SCI、EI、ISTP、SA
和IAA等国际检索收录. 获部委级科技进步一
等奖2项、二等奖3项、三等奖2项, 军事科学优
秀成果一等奖1项. 现为中国人民解放军军械工
程学院副院长, 主要从事电子战作战模拟、电
子系统效能评估技术研究. E-mail: ygchen@netease.com