

# UWB FLGPSAR 天线方向图的回波域校正方法

李莎 张汉华 周智敏  
(国防科学技术大学电子科学与工程学院)

**摘要:** UWB FLGPSAR 具有近场和超宽带特性,使得天线方向图的角度和频率特性对系统性能的影响不能忽略。本文从 UWB FLGPSAR 系统和回波特性出发,提出基于参考点的回波域方向图校正方法。通过预先对成像区域分块,利用最小二乘方法提取出每一分块中参考点的校正数据。以后所有待校准的回波都可以用已有的各参考点的校正数据对回波校正后,逐个对对应分块成像,并最终实现对整个成像区域方向图的校正后成像。仿真和实测数据验证了方法的可行性和有效性,通过校正,信噪比和分辨率都得到很大改善。

**关键词:** UWB FLGPSAR; 近场; 阵列信号; 方向图校正

## Antenna Pattern Calibration in the Echo Domain for UWB FLGPSAR

Li Sha Zhang Hanhua Zhou Zhimin  
(School of Electronic Science and Engineering National University of Defense Technology)

**Abstract:** Due to the near-field characteristic of the UWB FLGPSAR, there will be a large beam width covering with the detecting area. And with the UWB characteristic, the antenna pattern is the function of frequency and angle, and the important is the effect on the system performance from the antenna pattern cannot be neglected. In this paper, a calibration method based on the reference point in echo domain is proposed. The whole imaging area is divided into some sub-areas, and each sub-area has a reference point whose calibration data are obtained from its echo by using least square method. And then the other echo for calibration can be calibrated by each calibration data, and after imaging of corresponding sub-area one by one, the whole imaging area is calibrated and imaged. The method is availability and validity which is verified by simulation and actual measurement data. After calibration, not only the resolution but also the signal-to-noise ratio is improved.

**Keywords:** UWB FLGPSAR; near-field; array signal; antenna pattern calibration

### 1、概述

超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)是结合UWB技术和SAR技术的一种新型雷达,同时具有优良的分辨率和强大的穿透性能,能够探测到叶簇和地表之下的隐蔽目标,是反隐蔽、反伪装的利器,在军事和民用领域都具有非常广阔的应用前景,受到了各国的高度重视。UWB FLGPSAR系统采用实阵列录取回波,目标位于阵列的近场,在成像方面与SAR成像技术相同,等同于一种平台特殊的正侧视超宽带SAR,这类系统有美国PSI公司的FLGPSAR<sup>[1][2]</sup>和SRI的车载前视GPR<sup>[3][4]</sup>。UWB FLGPSAR系统由于具有远距离、大范围探测隐蔽、埋设目标的能力,已经成为地雷及其它埋地军事小目标探测技术的一个重要发展方向。

UWB FLGPSAR探测目标位于阵列的近场使得天线波束张角较大,从而在整个合成孔径内,雷达与目标视角的变

化范围较大。UWB FLGPSAR同时具有超宽带特性和大波束张角特性:天线方向图随频率的变化将导致距离向主瓣宽度展宽,旁瓣电平增加;而天线方向图随角度的变化将影响系统方位向聚焦性能,导致方位向分辨率的降低。由于UWB FLGPSAR天线方向图是频率和角度的函数,其校准方法比常规SAR更加复杂。本文根据UWB FLGPSAR的系统和回波特性,对成像区域分块,利用最小二乘方法从各分块参考点中提取校正数据对分块进行校正。仿真和实测数据验证了方法的可行性和有效性,通过校正,信噪比和分辨率都得到很大改善。

### 2、天线方向图分析

UWB FLGPSAR系统天线是收发分置形式的实孔径天线阵列,阵列天线发射或接收的方向图为:

$$G(\varphi, \theta, f) = B(\varphi, \theta, f) \exp[-j2\pi\omega(\varphi, \theta, f)] \quad (1)$$

式(1)中  $\varphi$  和  $\theta$  分别表示立体方向图中的方位角和子午角,  $B$  表示  $(\varphi, \theta, f)$  处方向图幅度值,  $\omega$  表示  $(\varphi, \theta, f)$  处方向图相位值。如图1所示: 在近场条件下, 每一个天线单元相对于场景中点目标的角度都不一样, 导致场景中每个象素点在阵列中的方向图都不一样。

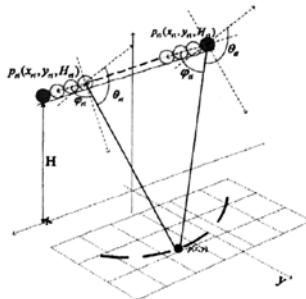


图 1 UWB FLGPSAR 系统模型

如图1所示: 不妨设天线收发分置形成  $I$  个接收通道, 则第  $i$  个接收通道回波同时受发射天线和接受天线方向图影响, 则  $i$  通道回波方向图影响可表示为:

$$\begin{aligned} GG_i &= G_t(\varphi_u, \theta_u, f) * G_r(\varphi_r, \theta_r, f) \\ &= B(\varphi_u, \theta_u, f) \exp[-j2\pi\omega(\varphi_u, \theta_u, f)] * B(\varphi_r, \theta_r, f) \exp[-j2\pi\omega(\varphi_r, \theta_r, f)] \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可得, 对于某点目标  $p(x, y)$ , 其相对于每个天线单元的方位角和子午角已确定, 则其  $i$  通道回波的方向图将只随频率  $f$  变化。因而, 成像区域中每一像素点的方向图可认为是幅度、相位都与通道  $i$  及频率  $f$  相关的函数。则点目标  $p(x, y)$  的  $i$  通道方向图可表示为:

$$GG_p(i) = B_p(i, f) \exp[-j2\pi\omega_p(i, f)] \quad i=1, 2; I \quad (3)$$

对目标回波进行方向图校正时还应考虑目标散射特性的影响。目标散射特性是随方位角  $\varphi$  和频率  $f$  变化的函数, 且不同类型目标的散射特性不同。关于目标散射特性的求解见文献[5], 本文在后续的讨论中都假设回波中已去掉目标电磁散射特性的贡献, 从而只考虑方向图的影响。

### 3、天线方向图校正

#### 3.1 回波信号分析

超宽带SAR的信号制主要有冲激信号体制和步进频率信号体制, 在国外现有系统中这两种体制都有所采用。而步进频率体制可以极大地降低系统带宽, 从而可以降低A/D变换的采样率, 提高系统灵敏度以及动态范围, 下面就以连续波步进频率信号(SFCW)体制的UWB FLGPSAR系统进行分析。

步进频率体制雷达的发射和本振信号可表示为:

$$s_t(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp[-j2\pi(f_0 + n\Delta f)t] \quad (4)$$

其中,  $N$  为频率步进数,  $\Delta f$  为频率步进间隔增量。理想回波与本振混频后做IFFT即可获得高分辨率一维距离像, 一维脉压后回波可表示为:

$$S_l(m) = \frac{1}{N} \exp[j \frac{(N-1)\pi}{N}(m - \frac{2NR_l\Delta f}{c})] \cdot \frac{\sin[\pi(m - \frac{2NR_l\Delta f}{c})]}{\sin[\pi(m - \frac{2NR_l\Delta f}{c})]} \quad (5)$$

$m = 0, 1, \dots, M-1$ ,  $M$  为IFFT的点数,  $R_l$  表示目标与天线  $i$  之间的距离。如图1所示, 发射信号(4)由发射天线  $p_u$  发射, 波束到达场景中点目标  $p(x, y)$  后反射回接收天线阵, 等间隔排列的一组天线单元组成阵列来录取回波。根据第2节对方向图的分析, 第  $i$  个接收通道点目标回波可表示为:

$$s_n(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp[-j2\pi(f_0 + n\Delta f)(t - \frac{R_u + R_n}{c})] GG_p(i) \quad (6)$$

$R_u$  和  $R_n$  表示第  $i$  通道回波发射、接收天线离点目标的距离。点目标回波与本振混频后, 信号表达式为:

$$s_n = \sum_{n=0}^{N-1} \exp[-j2\pi n\Delta f \frac{R_u + R_n}{c}] GG_p(i) \quad (7)$$

在回波特性和图像特性上, 最优的FLGPSAR天线配置可以与虚拟单站SAR模型等效<sup>[6]</sup>, 因而可令:  $R_u + R_n = 2R_i$ 。则一维脉压回波可表示为:

$$\begin{aligned} S_n(m) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s_n(n) \exp(j \frac{2\pi mn}{N}) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp[-j2\pi n\Delta f \frac{2R_i}{c}] B(i, n\Delta f) \exp[-j2\pi\omega(i, n\Delta f)] \exp(j \frac{2\pi mn}{N}) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} B(i, n\Delta f) \exp[-j2\pi n(\Delta f \frac{2R_i}{c} - \frac{m}{N} + \frac{\omega(i, n\Delta f)}{n})] \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 由于方向图函数随频率变化的影响, 使得一维脉压后回波主瓣将展宽。在方位向上, 由于目标相对不同天线单元的角度不一致, 导致每一通道回波方向图不一致, 方位向分辨率也会因此而降低。

#### 3.2 回波域校正思路

由于场景中每个点方向图都不一样, 理想的校正方法是: 计算出成像区域中每一像素点的校正数据, 对回波校正后, 对每一像素点分别成像后合成。显然, 理想方法是不符合实际的。考虑到方向图函数的幅度和相位在一定角度范围内都是随角度缓慢变化的, 因而可以对成像区域进行分块成像, 在每一小块中选取一个参考点用于提取校正数据, 分块中所有点都用该点的校正数据进行校正。分块原则要从计算量和成像质量两方面考虑: 通过校正后每一块区域中的点目标信噪比和分辨率达到一定的指标要求, 分块数量要满足实时成像的要求, 分块方法从易于实现的角度考虑选择正方形或长方形的网格划分形式(距离越远网格越大)。每一小块

校正参考点的选取，要尽量使分块中每一点补偿后都能达到较好的成像效果，实际操作中，只要使边界的点达到预定效果即可满足要求。具体的分块和参考点求解方法依方向图影响和天线配置情况而定，在此不做详细分析。

校正步骤总结如下：校正数据获取：根据成像区域各分块中选定的参考点坐标计算出各点所有通道的天线方向图校正数据矩阵；对其他待校准回波的校准成像：1、其中一个分块的校正数据对原始回波进行补偿，2、对补偿后的回波信号作一维脉压，3、利用SAR成像算法得到该分块区域的SAR图像，4、对整个成像区域的每个分块区域重复步骤1、2、3，得到整个成像区域的最终SAR图像。

### 3.3 校正方法

由式(8)可以看出，单通道回波一维脉压后每一点的值可以认为是回波的每一数据点的加权叠加。考虑到加权因子，即对回波每一数据点进行加权后的相干叠加，则某一通道一维脉压回波可表示为：

$$\begin{bmatrix} \sum_{m=0}^{N-1} ss(0, m)ss^*(0, m) & \sum_{k=1}^K ss(1, m)ss^*(0, m) & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{m=0}^{N-1} ss(0, m)ss^*(1, m) & \dots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{m=0}^{N-1} ss(0, m)ss^*(N-1, m) & \dots & \vdots \end{bmatrix}$$

用式(9)获得的加权因子，只是某参考点目标在某一通道的加权因子，因每一通道回波受方向图影响不一致，对于每一个分块区域，需要用式(9)获得所有  $I$  个通道的加权因子。将获得的加权因子与其它待校准的回波数据相乘，即可得到校准后的回波。

由于校正数据的提取是基于理想点目标和受方向图影响的目标回波，因而在实际处理中，受方向图影响的参考点目标回波，其背景、耦合、散射等影响都应已去除干净。否则在校正数据提取时，残余的背景、耦合、散射等影响将视为方向图的影响，从而导致校正数据出现误差。加上每个目标的散射特性不一样，不同回波的背景、耦合等也不一样，如果用误差较大的校正数据对其他待校准回波进行校正的话，不仅达不到校正效果甚至可能使回波失真更严重。为获得无背景杂波的参考点回波数据，较好的方法是将系统置于微波暗室，用三面角或金属圆球等作为参考点目标获得回波，去除耦合、散射等影响后，提取出较为精确的校正数据。这样，预先提取出来的校正数据受背景影响小，可以较好的校正其它任何场景中的回波。

$$\hat{S}_{ri}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} Gc(n)ss_{ri}(n, m) \quad (9)$$

$$ss_{ri}(n, m) = \frac{1}{N} s_{ri}(n) \exp(j \frac{2\pi mn}{N}) \quad (10)$$

其中  $m$  为一维脉压数据点数  $m=0,..,N-1$   $N$  为频点数， $\hat{S}_{ri}(m)$  表示一维脉压后的估计值， $Gc$  为加权系数。如果加权系数正好与天线方向图成反比，使得加权因子与天线方向图的乘积为常数，那么天线方向图对图像的影响将得到消除。仿真的理想点目标一维脉压数据即可作为估计问题中的真值，其某一通道回波脉压后数据为  $Sl_i(m)$ 。因而可以利用最小二乘方法，调整加权因子  $Gc$ ，使得  $S_{ri}(m)$  和  $\hat{S}_{ri}(m)$  的均方误差  $\xi^2$  最小：

$$\xi^2 = E\{\|\hat{S}_{ri}(m) - S_{ri}(m)\|^2\} \quad (11)$$

通过矩阵方程(12)可求得某一通道点目标对应的方向图数据矩阵的倒数。

$$\begin{bmatrix} \sum_{m=0}^{N-1} ss(N-1, m)ss^*(0, m) \\ \vdots \\ \sum_{m=0}^{N-1} ss(N-1, m)ss^*(N-1, m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Gc(0) \\ Gc(1) \\ \vdots \\ Gc(N-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{m=0}^{N-1} Sl_i(m)ss^*(0, m) \\ \vdots \\ \sum_{m=0}^{N-1} Sl_i(m)ss^*(N-1, m) \end{bmatrix} \quad (12)$$

## 4、基于仿真和实测的数据处理结果

### 4.1 仿真实验

在计算机仿真试验中，以一个分块为例，首先仿真分块中参考点的理想点目标回波  $p(0,7)$ ，对其做ifft得到估计中的真值  $\sum_{i=1}^I Sl_i(m)$ 。为了得到受方向图影响的回波，先对单个天线的方向图进行测量。为了保证系统的性能，各天线单元要尽量做到一致，因而可认为各单元的方向图也具有一致性。从而可利用实测的单个天线方向图数据，根据点目标相对于每一通道发射和接收天线单元的方位角和俯仰角，计算出该点目标  $I$  个通道回波的方向图矩阵：

$$GG = [B(1, n\Delta f) \exp[-j2\pi n(1, n\Delta f)] \dots B(I, n\Delta f) \exp[-j2\pi n(I, n\Delta f)]] \quad (13)$$

每一通道理想回波乘以对应的方向图矩阵，即得到受方向图影响回波：

$$s_r = \sum_{i=1}^I \sum_{n=0}^{N-1} s_{ri}(n) \quad (14)$$

其中  $I$  为通道数， $N$  为频率步进数。点  $p(0,7)$  的理想回波成像结果和受方向图影响回波成像结果的对比如图2所示：受

方向图影响回波成像聚焦效果变差，在方位向和距离向上主瓣被展宽，旁瓣电平很高，无法精确定位目标位置。

获得一维脉压后的理想回波数据和受方向图影响的回波数据后，通过矩阵方程(12)，可计算出  $p(0,7)$  这一点每一通道的加权因子（即校正数据） $G_c$ 。 $G_c$  与其它受方向图影响的回波数据相乘即得到校准后的回波，成像结果如图3所示：左边图为受方向图影响的两点目标回波的成像结果；右边图为用  $G_c$  对受方向图影响的回波校正后的成像结果，信噪比和分辨率都得到有效提高，仿真结果验证了方法的有效性。

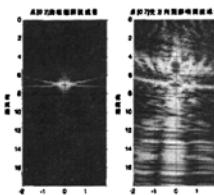


图2 理想回波和受方向图  
影响回波成像结果

#### 4.2 实测数据试验

根据3.3节的分析，为获得理想的校准数据，需将系统置于微波暗室进行试验，但这样操作复杂，难以实现，本文用于提取校准数据的回波是在背景单一的室外录得的。以点  $p(-1,12)$  为例，对录得的原始点目标回波进行减背景、多通道校正和色散校正后，其成像结果如图4所示：近端耦合很严重，如果直接用该回波数据来获取校正数据的话，误差太大。从图4可以看出：距离向上离目标前后4米左右的地方方向图的影响已经很小，可以不予考虑。因而在提取校准数据时，对该回波做一维脉压后加窗，截取出8-16米距离范围内的回波数据，将截取后的回波变换到回波域获得只受方向图影响的回波  $s_p$ 。用仿真的  $p(-1,12)$  处理想点目标一维脉压回波和  $s_p$ ，通过最小二乘方法获得该点位置的校正数据  $G_{cp}$ 。将  $p_1(0,11)$  处实测原始回波，进行减背景、多通道校正和色散校正后，截取出距离向上8-16米的目标回波  $s_{p1}$ 。 $s_{p1}$  与  $G_{cp}$  相乘即获得校正后的回波，其成像结果如图5所示：校正后，距离向分辨率提高，旁瓣降低5db左右；方位向旁瓣也降低了5db左右。

### 5、结论

通过对UWBFLGPSAR系统分析，得出天线方向图对系统的影响不能忽略。利用UWBFLGPSAR系统结构和回波模型，分析了天线方向图对系统性能的影响，给出了基于参考点的分块天线方向图校准算法，并讨论了校准算法的性能。

通过仿真和实测数据验证了该校准算法的可行性和有效性。

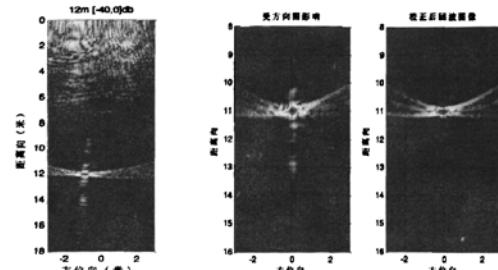


图5 实测回波成像

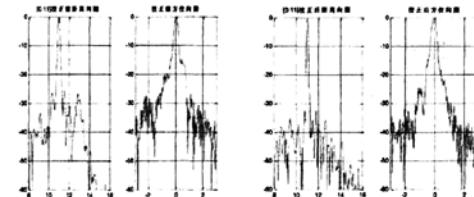


图6(a) 实测数据校正前后二维成像

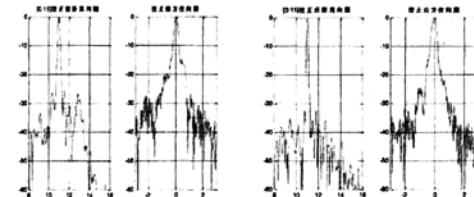


图6(b) 实测数据校正前后距离向和方位向性能比较

图6 实测数据校正前后成像结果比较

#### 参考文献

- [1] Marshall Bradley, Thomas Witten, Robert McCummins, Michael Duncan. Mine detection with ground penetrating synthetic aperture radar, Proc. of SPIE. 4742:248-258, 2002
- [2] Marshall R. Bradley, Thomas R. Witten, Michael Duncan, Robert McCummins. Anti-tank and side-attack mine detection with a forward-looking GPR, Proc. of SPIE. 5415: 421-432, 2004
- [3] Joel Kositsky, Peyman Milanfar. A forward-looking high-resolution GPR system, Proc. of SPIE. Orlando, 3710:1052-1062, 1999
- [4] Yijun Sun, Jian Li. Landmine detection using forward-looking ground penetrating radar, Proc. of SPIE, Bellingham, WA, 5794:1089-1097, 2005
- [5] 邹鲲, 梁甸农. 低频UWBSAR天线方向图频域校正, 信号处理, 第22卷, 第5期, 2006年10月
- [6] 王建. 车载前视超宽带SAR浅埋目标成像技术研究, [博士学位论文], 长沙: 国防科学技术大学, 2008

#### 作者简介

李莎, 女, 1984年生, 湖南益阳人, 硕士生。目前就读于国防科学技术大学电子科学与工程学院, 主要研究内容为: UWB FLGPSAR 系统仿真与校正。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>

---



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>