

低频 UWBR 的辐射校准*

邹 鲲, 梁甸农, 董 臻

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要 针对高频窄带系统的常规雷达辐射校准技术不能适用于低频超宽带雷达系统。根据低频超宽带雷达系统特点,采用矩量法和渐进波形估计技术,建立定标体的低频宽带散射模型,给出辐射校准函数,实现对 UWBR 的辐射校准。最后结合低频 UWBR 合成孔径雷达系统,进行计算机仿真试验,证明这种方法的有效性。

关键词 辐射校准;低频散射模型;超宽带雷达

中图分类号:TP957 文献标识码:A

Radiometric Calibration of Low Frequency UWBR

ZOU Kun, LIANG Dian-nong, DONG Zhen

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Regular radiometric calibration techniques developed for high frequency narrow band radar system are not applicable for low frequency ultra-wideband radar(UWBR). The low frequency scattering model is calculated using method of moment(MOM) and asymptotic waveform evaluation(AWE) technique, and the calibration method is proposed. Computer simulation is used to verify the validity of this calibration method.

Key words radiometric calibration; low frequency scattering model; ultra-wideband radar

工作在 VHF/UHF 低频超宽带雷达(UWBR)利用发射大带宽信号获得较高的距离分辨率,其低频特性使得这种雷达具有叶簇穿透(FOPEN)和地表穿透(GPEN)的功能。将该系统安装在移动的平台构成 UWBR 合成孔径雷达(SAR),可以获得高分辨率,同时还可以探测隐蔽目标。因此,对低频 UWBR 的研究越来越受到人们的重视。

通常的高频窄带雷达辐射校正中使用的定标体,如角反射器,其尺寸通常为雷达工作波长的数十倍,散射特性可以用高频散射模型进行计算。由于系统发射信号的窄带特性,定标体的散射特性通常可以近似为常量。而对低频 UWBR 进行辐射校正,角反射器的尺寸通常和系统工作波长相接近,其散射特性难以满足高频散射模型。系统超宽带特性使得定标体雷达截面积(RCS)随频率变化不能够忽略。

本文主要针对中心频率为 300MHz、系统带宽为 200MHz 的 UWBR 进行辐射校准,采用的定标体是边长为 0.5m 的三面角反射器。

1 定标体的低频散射模型

1.1 利用 MOM 计算定标体 RCS

矩量法是一种常用的计算低频散射的数值方法,它将散射积分方程转换为矩阵方程进行数值计算,得到散射体表面电流密度,从而可以分析其散射特性。散射场由(1)式获得:

$$E^s = -j\omega A - \nabla\varphi \quad (1)$$

其中,矢量 A 和标量 φ 分别为磁矢位和电位,都是散射体表面电流密度 J 的函数。由于理想导体表面切向电场为 0,若散射体表面入射切向电场已知,代入(1)式就可以建立以电流密度 J 为变量的散

* 收稿日期 2004-08-05

作者简介:邹鲲(1976—),男,博士生。

射积分方程。为了适于数值计算,还需要将电流密度离散化,这里采用三角形子面元剖分散射体表面,利用 Rao-Wilton-Glisson 基函数^[2]将电流密度 J 展开。RWG 基函数有如下形式:

$$f_n(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \boldsymbol{\rho}_n^+, & r \in T_n^+ \\ \frac{l_n}{2A_n^-} \boldsymbol{\rho}_n^-, & r \in T_n^- \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)中的电流密度用式(2)展开后并转换为矩阵方程

$$\mathbf{Z}\mathbf{I} = \mathbf{V} \quad (3)$$

其中 \mathbf{Z} 为广义阻抗, \mathbf{I} 和 \mathbf{V} 分别为广义电流和广义电压。求得电流密度后可以利用式(4)得到散射场的解,并可以用式(5)求得 RCS。

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{R}) = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi R} \exp(-jkR) \iint_S \mathbf{J}(\mathbf{r}') \exp(j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}') dS \quad (4)$$

$$RCS = 4\pi \cdot \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \cdot \frac{|\mathbf{E}^s|^2}{|\mathbf{E}^i|^2} \quad (5)$$

1.2 利用 AWE 和 padé 近似获得定标体宽带 RCS

矩量法的主要缺点就是每次计算只能计算一个频点上的散射特性,如果要得到整个频带上的散射特性,必须借助其他方法。渐进波形估计(AWE)技术是一种很好的方法,它首先应用在 VLSI 电路互联结构和微波器件宽频带响应的计算等方面,在估计 RCS 宽频带响应方面能取得较好的结果。

矩阵方程中的广义阻抗,广义电流和广义电压都是频率的函数。将未知电流 I 用 Taylor 级数展开得到:

$$\mathbf{I}(k) = \sum_{n=0}^{\infty} \mathbf{M}_n(k - k_0) \quad (6)$$

系数 M_n 与 \mathbf{Z} 和 \mathbf{V} 的关系:

$$\mathbf{M}_n = \mathbf{Z}^{-1}(k_0) \left[\frac{\mathbf{V}^{(n)}(k_0)}{n!} - \sum_{q=0}^{n-1} \frac{(1 - \delta_{q0}) \mathbf{Z}^{(q)}(k_0) \mathbf{M}_{n-q}}{q!} \right] \quad (7)$$

利用 Taylor 级数展开的方法得到的估计值收敛区间较小,不宜用来估计 UWBR 散射特性,但是利用有理函数逼近的方法,如 padé 近似^[3],可以获得更大频率域范围内的电流估计值。其基本方法如下:

$$\sum_{i=0}^{\infty} c_i z^i - \frac{P_m(z)}{Q_n(z)} = O(z^{m+n+1}) \quad (8)$$

其中 P_m 和 Q_n 分别为系数为 a_i 的 m 阶和系数为 b_i 的 n 阶多项式,并规定 $b_0 = 1$ 。

图 1 和图 2 分别为计算得到的边长为 0.5m 角反射器的 RCS 的幅频特性和相频特性。其中,虚线表示利用 Taylor 展开获得的估计值,粗实线表示利用 padé 近似获得的 RCS 的估计值,图中的圆圈表示利用 MOM 得到对应频点的计算值。Taylor 级数展开的方法在大约 100MHz 带宽内可以较为准确地估计 RCS 宽带特性,而通过 padé 近似扩大了 RCS 宽带特性的估计范围,在 300MHz 带宽范围内

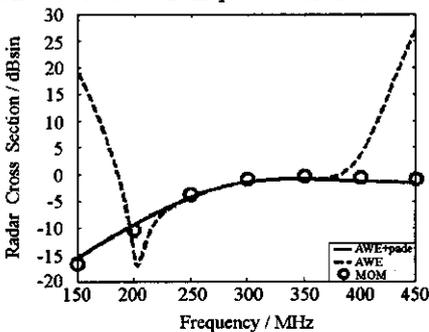


图 1 三面角反射器 RCS 幅频特性

Fig. 1 The amplitude-frequency response of RCS

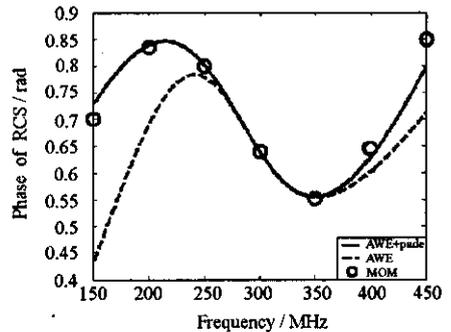


图 2 三面角反射器 RCS 相频特性

Fig. 2 The phase-frequency response of RCS

均可以得到与 MOM 较为吻合的 RCS 估计值。

2 辐射校准

2.1 辐射校准原理

超宽带雷达方程可以表示为^[41]：

$$P_r(f) = \frac{\int |s(f) \cdot H_t(f, \alpha, \beta) \cdot H_r(f, \alpha, \beta) \cdot H_s(f, \alpha, \beta)|^2 df}{(4\pi R^2)^2} \quad (9)$$

其中 $s(f)$ 为发射信号的频谱, H_t 和 H_r 分别表示发射天线和接收天线的频率响应, H_s 表示目标的频率响应, α 和 β 表示空间角度, $P_r(f)$ 表示接收信号功率谱。可见, 在 UWB 雷达系统中, 系统参数都是频率的函数, 由此可以在接收机信号接收通道加入补偿滤波器：

$$H_{cal}(f, \alpha, \beta) = \frac{1}{H_t(f, \alpha, \beta) H_r(f, \alpha, \beta)} \quad (10)$$

即可实现系统频率响应的补偿。而天线收发系统的频率响应很难直接得到, 但是可以通过辐射校准的方法估计出来。

$$H_{cal}(f, \alpha, \beta) = \frac{r(f)}{s(f) \cdot H_s(f, \alpha, \beta)} \quad (11)$$

其中 $r(f)$ 为来自定标体的回波信号频谱, $s(f)$ 表示发射信号频谱, 而定标体的频率响应函数 $H_s(f, \alpha, \beta)$ 可以通过上一节的计算方法获得。这样结合第 2 节得到的角反射器的 RCS 频率响应曲线, 利用 (11) 式就可以对 UWBR 进行辐射校准了。

2.2 辐射校准方法的计算机仿真

结合低频 UWB SAR 系统, 辐射校准算法流程如图 3 所示。首先将角反射器放置在校验场, 利用 UWB SAR 对其进行成像处理, 获得角反射器的 SAR 图像, 该图像中包含有系统误差特性和角反射器的散射特性, 其误差来源于系统内部和天线的频率响应。利用第一节介绍的方法建立角反射器的低频散射模型, 并对其进行成像处理, 得到角反射器的仿真 SAR 图像, 该图像只包含角反射器的散射特性。利用两种图像在二维频率域上的差异, 可以获得系统的误差特性的补偿函数。利用该函数可以补偿该系统得到的其他 SAR 图像, 从而实现 UWB SAR 图像的校准。常规 SAR 的校准方法通常不考虑定标体的散射特性, 这样获得的补偿函数不仅包含有系统误差特性, 还包含有定标体的散射特性。对于高频窄带系统而言, 定标体散射特性可以认为是常量。而对于低频超宽带系统, 定标体的谐振散射特性不能作为常量, 否则校准的效果不仅不会得到改善, 甚至有可能变得更差。

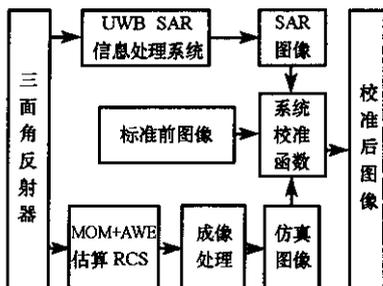


图 3 辐射校准流程图

Fig. 3 Flow chart of calibration procedure

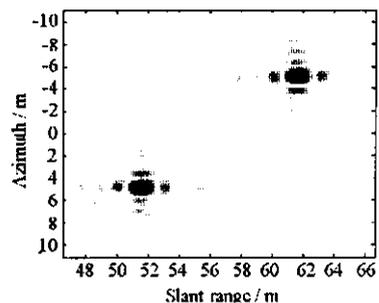


图 4 辐射校准前图像

Fig. 4 SAR image before calibrating

图 4 表示未经辐射校准的原始图像, 目标周围有较强的旁瓣存在, 考虑到定标体的宽带特性, 对原始图像进行辐射校准后得到图 5, 可见目标的旁瓣明显减弱, 图像质量得到提高。如果不考虑定标体的宽带散射特性, 如图 6 所示, 辐射校准的效果并不明显, 图像质量没有太大的提高。

(下转第 64 页)

点 FFT/IFFT 时间只需 $29\mu\text{s}$,完成 1024 点 FFT/IFFT 时间只需 $64\mu\text{s}$,处理误差小于 -80dB ,功耗小于 1W 。整个处理器设计占用 FPGA 资源情况如下 :

Number of Slices	2406	out of	5120	47%
Number of Block RAMs	16	out of	40	40%
Number of MULT18X18s	8	out of	40	20%

3 结束语

针对定点 FFT 处理器精度低的不足 ,提出并实现了一个自定义浮点格式的 FFT 处理器。在设计与实现的过程中 ,关键是结合 FFT 算法和 FPGA 结构特点 ,减少资源开销、提高处理速度、降低功耗。

虽然 ,该处理器运算速度较通用 DSP 提高了很多 ,但这还不能满足某些高速数字信号处理系统的要求 ,所以还应该在提高处理器处理能力方面开展更深入的研究。

参考文献 :

- [1] Shaditalab. Self-sorting Radix-2 FFT on FPGAs Using Parallel Pipelined Distributed Arithmetic Blocks[A]. IEEE Symposium on FPGAs , Montreal(Canada) ,1998 337 - 338.
- [2] Perez-Pascual. FPGA-based Radix-4 Butterflies for Hiperlan/2[A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems , Valencia (Spain) 2002 277 - 280.
- [3] 刘朝辉 ,韩月秋 . 用 FPGA 实现 FFT 的研究 [J]. 北京理工大学学报 ,1999 ,12(2) 234 - 238.
- [4] 清华大学无线电系快速傅立叶变换组 . 快速傅立叶变换 [M]. 北京 :人民邮电出版社 ,1980.
- [5] 胡振华 . VHDL 与 FPGA 设计 [M]. 北京 :中国铁道出版社 2003.

(上接第 60 页)

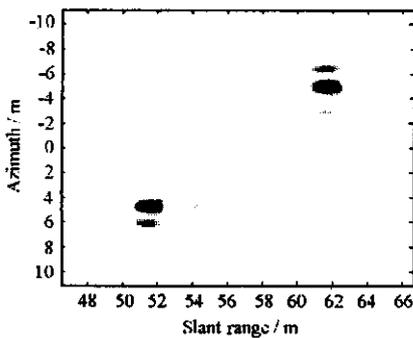


图 5 采用角反射器辐射校准后的图像

ig. 5 SAR image calibrated using a triangle reflector

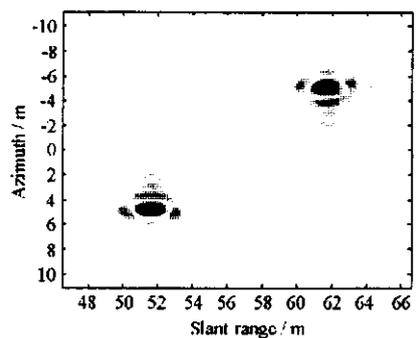


图 6 采用理想点目标辐射校准后的图像

Fig. 6 SAR image calibrated using an ideal point target

3 结论

低频超宽带雷达的工作带宽和工作波长与常规高频窄带雷达有很大区别 ,因而不能适用常规雷达的辐射校准技术。低频特性要求目标的电磁模型为低频散射模型 ,宽带特性要求该散射模型必须是频率的函数。在构造补偿滤波器的时候必须考虑目标的宽带散射特性 ,才可以得到较好的辐射校准效果。

参考文献 :

- [1] Freeman A. SAR Calibration : An Overview[J]. IEEE Trans. GRS ,1992 1107 - 1121.
- [2] Rao S M , Wilton D R , Glisson A W. Electromagnetic Scattering by Surfaces of Arbitrary Shap[J]. IEEE Trans. AP. 1982 ,AP - 30 : 409 - 418.
- [3] Cockrell C R , Beck F B. Asymptotic Waveform Evaluation (AWE) Technique for Frequency Domain Electromagnetic Analysis[R]. NASA Technical Memorandum 110292 ,1996.
- [4] 黎海涛 ,徐继麟 . 超宽带雷达方程 [J]. 电子科技大学学报 2000 (2) .

