

文章编号: 1001-2486 (2002) 02-0049-05

## UWB - SAR 抑制 RFI 算法性能评估与测试\*

周智敏, 黄晓涛, 常文革, 梁甸农

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 参数化方法是实现 UWB - SAR 抑制 RFI 的重要手段。为评估抑制 RFI 算法的实际性能, 利用 UWB - SAR 实验系统的实测数据, 从干扰抑制能力和脉冲压缩性能改善两个方面对几种主要算法进行了比较分析。结果表明, 在干扰能量抑制比和脉冲压缩指标度量下, 几种典型的参数化算法都能显著提高接收信号的信干比, 而基于正弦波模型的算法略优于基于 AR 模型的算法。

**关键词:** 射频干扰; 超宽带合成孔径雷达; 干扰能量抑制比; 脉冲压缩

中图分类号: TN957 文献标识码: A

## Performance Evaluation and Test of RFI Suppression Algorithms for UWB - SAR

ZHOU Zhi - min, HUANG Xiao-tao, CHANG Wen-ge, LIANG Dian - nong

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

**Abstract:** Parametric methods are the important techniques for the implementation of Radio Frequency Interference (RFI) suppression in Ultra - WideBand Synthetic Aperture Radar (UWB - SAR). In order to evaluate the practical performance of RFI suppression algorithms, several primary algorithms are compared by the interference suppression capability and pulse compression performance. The results with real data from our experimental UWB - SAR show that parametric algorithms can greatly improve the signal - to - interference ratio. Furthermore, the algorithms based on sinusoidal model are a little better than those based on AR model.

**Key words:** radio frequency interference; ultra - wideband synthetic aperture radar; interference - energy - suppression ratio; pulse compression

为实现对叶簇或地表覆盖隐蔽目标的探测与成像识别, 超宽带合成孔径雷达 (UWB - SAR) 几乎都工作在 VHF/UHF 波段, 这是因为该波段的电磁波与 L、S、C 等波段的微波相比, 对叶簇和地表具有更强的穿透能力。然而, VHF/UHF 波段已密布了各种不同用途的无线电系统, 如广播、电视、移动通信等, 而 UWB - SAR 系统带宽通常高达数百兆赫兹, 其必然与它们构成频谱共用关系。因此, 在实际应用中, 和其他传统窄带雷达系统不同, UWB - SAR 将面临新的电磁兼容问题。由于 UWB - SAR 信号功率几乎平均散布在整个系统带宽上, 其对各窄带无线电系统造成的影响一般可不考虑。但问题的另一方面是: 这些窄带无线电系统的发射信号会进入具有宽带接收特性的 UWB - SAR, 形成射频干扰 (RFI), 并且它们具有远高于系统背景噪声的功率电平。此外, 为保证方位向高分辨力, UWB - SAR 采用了宽的天线方位向波束, 这样也扩大了 RFI 进入这类系统的空域范围。

从 UWB - SAR 接收系统角度讲, RFI 的影响主要表现在两个方面<sup>[1]</sup>: 一是容易造成接收机饱和而无法正常工作, 并损失目标回波的有效动态范围, 给接收机硬件设计带来不便; 另一方面, RFI 的存在降低了 UWB - SAR 的成像质量, 使得本来就面临高杂波环境的目标检测与识别任务更为艰巨。

为解决 UWB - SAR 抑制 RFI 问题, 研究人员已相继提出数种方法。参数化方法由于具有较高的估计精度和 RFI 抑制能力受到了极大重视, 其中具有代表性的有基于特征结构分析的最大似然法 (SBEAMLE)<sup>[2]</sup>、GRELAX 算法<sup>[3]</sup>、基于 TH 神经网络的 AR 建模法 (THNNPEF)<sup>[4]</sup>及双边平滑 LMS 算法

\* 收稿日期: 2001-07-11

基金项目: 校标志性科研项目和国家部委重点预研项目资助

作者简介: 周智敏 (1957-), 男, 教授。

(TSSLMS)<sup>5]</sup>等。为检验这些抑制 RFI 算法的性能, 本文利用实测数据对其进行评估。

## 1 算法的抑制 RFI 能力

### 1.1 算法性能评估指标

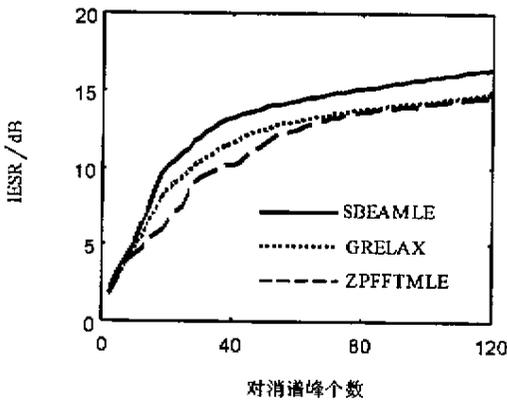
在低信噪比下, RFI 信号占据了 UWB-SAR 接收信号能量的绝大部分, 当采用相应算法对其进行抑制后, RFI 信号的能量将大大减少。由于接收信号中的目标回波及其他背景噪声的功率一般很难确定, 估计残差功率 (ERP) 在评估算法的抑制 RFI 能力时便不适于作为统一标准, 至于各参数的估计方差则更缺乏衡量尺度的现实性。为此, 定义干扰能量抑制比 (IESR) 作为评估算法抑制 RFI 能力的指标。设接收信号为  $x(n)$  ( $n=0, \dots, N-1$ ) 抑制 RFI 后的输出信号为  $y(n)$  则 IESR 为:

$$IESR = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x^2(n)}{\sum_{n=0}^{N-1} y^2(n)} \quad (1)$$

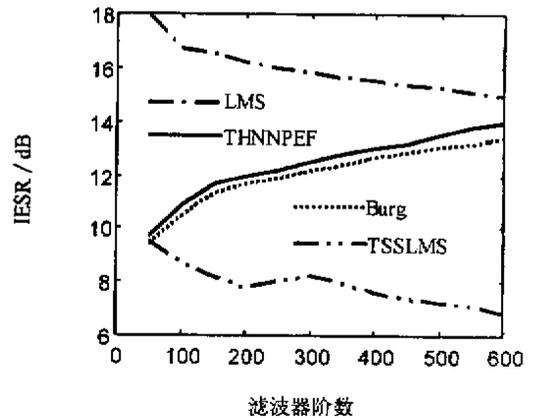
### 1.2 实验测试结果

实验选用以 UWB-SAR 接收机采集的 RFI 数据, 采样频率为 2GHz, 数据记录长度为 32768 点, 量化位数为 8 位, 以 2048 点为应用抑制 RFI 算法的数据长度。下面分别计算 SBEAMLE、GRELAX、THNNPEF 和 TSSLMS 及其他相应算法的 IESR 值, 其均为对 16 组 2048 点数据的平均结果。

图 1(a) 为 SBEAMLE、GRELAX 以及补零 FFT 最大似然法 (ZPFFTML) 的 IESR 随对消谱峰个数增加的变化情况。实线表示 SBEAMLE, 点虚线和长虚线分别表示 GRELAX 和 ZPFFTML。SBEAMLE 要明显好于另两种算法, 尤其是对消谱峰个数较多时能高出约 2dB。这是因为当 RFI 的强功率载波分量被抑制后, 单个谱峰中包含多个频率正弦信号的概率加大。GRELAX 与 ZPFFTML 性能很接近, 但 GRELAX 在开始阶段的抑制能力强于 ZPFFTML。



(a) 基于正弦波模型算法的 IESR 值



(b) 基于 AR 模型算法的 IESR 值

图 1 抑制 RFI 算法的 IESR 值

Fig.1 IESR of the RFI suppression algorithms

图 1(b) 为 THNNPEF、Burg、TSSLMS 以及标准 LMS 的 IESR 随预测误差滤波器阶数增加的变化情况, 实线表示 THNNPEF, 点虚线表示 Burg, 点划线和双点划线分别表示标准 LMS 和 TSSLMS。THNNPEF 在不同滤波器阶数下均好于 Burg, 而两种 LMS 算法却随滤波器阶数增加性能变差, 这是由于此时其收敛相对缓慢所致。

另外, 还可看到, 除自适应方法外, 就干扰能量抑制比而言, 基于正弦波模型的算法与基于 AR 模型的算法性能基本相近。

IESR 反映了抑制 RFI 前后信号能量的相对关系, 但由于其未考虑算法对 UWB-SAR 目标回波造成的失真, 因而还必须从 UWB-SAR 系统性能出发, 研究抑制 RFI 算法的效果。

## 2 算法对脉冲压缩性能的改善

### 2.1 算法性能评估指标

作为 LFM 体制 UWB-SAR 成像及目标检测与识别的首要环节，脉冲压缩性能好坏直接关系到其距离分辨力、信干比等指标的优劣。在外场存在 RFI 条件下，经脉冲压缩后的 UWB-SAR 接收信号将出现大范围的高峰值旁瓣，这一结论已得到实验验证<sup>[1]</sup>。抑制 RFI 算法应能显著消除上述影响以尽可能真实地再现目标回波的脉冲压缩输出。

通常，脉冲压缩的性能指标包括：主瓣高度 (MLH)、主瓣宽度 (MLW)、峰值旁瓣比 (PSLR) 等<sup>[6]</sup>。MLH 由于具有很大相对性而很难对脉冲压缩结果好坏做出准确评价，因此，本文将暂不考虑。MLW 则直接与 UWB-SAR 的距离分辨力相对应，一般以主瓣的 3dB 功率点之间的距离定义。PSLR 反映了脉冲压缩输出主瓣附近的精细结构，其提供了对输出信干比的一个度量。此外，为从全局角度衡量抑制 RFI 算法对脉冲压缩的改善情况，本节还利用积分旁瓣比 (ISLR) 以刻画目标回波与 RFI 能量的相对强弱，ISLR 的计算公式为：

$$\text{ISLR} = \frac{\sum_n y_M^2(n)}{\sum_n y^2(n) - \sum_n y_M^2(n)} \quad (2)$$

其中  $y(n)$  为脉冲压缩后的全段输出， $y_M(n)$  为  $y(n)$  在主瓣宽度内的部分。

### 2.2 实验测试结果

将上节中的 RFI 数据注入一理想 LFM 信号作为 UWB-SAR 接收信号。系统参数为：采样频率为 1GHz，信干比取为 -20dB。LFM 信号参数为：中心频率 150MHz，带宽 300MHz，时宽为 4096 个样本点。选用的抑制 RFI 算法同前节，评估算法性能的指标为：MLW、PSLR 和 ISLR。

表 1 比较了 SBEAMLE 与 ZPFFTMLE 对脉冲压缩性能的改善。最左边一列的数字代表对消谱峰个数，括号内的数据代表 ZPFFTMLE。SBEAMLE 能在相同数目的谱峰中对消更多的干扰成份。SBEAMLE 与 ZPFFTMLE 均存在一关于对消谱峰数的门限。对 SBEAMLE，其在 64 与 96 之间；对 ZPFFTMLE，则在 128 以上。

表 2 为 GRELAX 对脉冲压缩性能的改善。最左边一列的数字代表对消谱峰个数。RELAX 算法由于在所有实验中均无法得到可用结果而未列出。与表 1 相比，GRELAX 的性能介于 SBEAMLE 和 ZPFFTMLE 之间，其对消谱峰个数门限值亦如此。

此外，当对消谱峰数为 64 时，GRELAX、ZPFFTMLE 和 SBEAMLE 约需的计算量分别为 103MFLOPS、367MFLOPS 和 1026MFLOPS (MATLAB)。可见，GRELAX 在计算上的优势很明显。

表 1 SBEAMLE 和 ZPFFTMLE 对脉冲压缩性能的改善

Tab.1 Pulse compression improvement of SBEAMLE and ZPFFTMLE

	MLW(样本数)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
受干扰信号	6.0	-2.28	-21.37
32	5.0(9.0)	-9.29(-7.13)	-10.13(-10.53)
64	5.0(5.0)	-9.74(-7.83)	-7.88(-9.36)
96	5.0(5.0)	-9.55(-8.18)	-7.72(-8.16)
128	5.0(5.0)	-9.45(-8.34)	-8.15(-8.13)
理想信号	6.0	-13.47	2.92

表 2 GRELAX 对脉冲压缩性能的改善

Tab.2 Pulse compression improvement of GRELAX

	MLW(样本数)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
32	6.0	-8.56	-12.84
64	5.0	-8.86	-10.12
96	5.0	-8.54	-8.27
128	5.0	-8.01	-8.27

表 3 比较了 THNNPEF 与 Burg 对脉冲压缩性能的改善。最左边一列的数字代表预测误差滤波器阶数，括号内的数据代表 Burg 算法的结果。THNNPEF 的性能通常略优于 Burg。另外，尽管随着滤波器阶数增加，脉冲压缩性能不断提高，但付出的代价是边缘效应加重。表中倒数第二行即为我们运用前后向平均修正 (FBA)<sup>[1]</sup> 后的结果，PSLR 得到了 0.13dB 改善，ISLR 则提高了 0.67dB。

表4比较了TSSLMS与标准LMS对脉冲压缩性能的改善。最左边一列的数字代表预测误差滤波器阶数,括号内的数据代表标准LMS的结果。TSSLMS正常情况下的PSLR比标准LMS约低3.5dB,而ISLR则约高2dB。在表中倒数第二行同样给出了FBA修正结果。

表3 THNNPEF和Burg对脉冲压缩性能的改善

Tab.3 Pulse compression improvement of THNNPEF and Burg

	MLW(样本数)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
64	5.0(5.0)	-1.6(-1.57)	-13.5(-14.20)
128	5.0(5.0)	-4.3(-2.78)	-11.9(-12.68)
256	5.0(5.0)	-6.4(-5.94)	-10.7(-10.86)
512	5.0(5.0)	-7.9(-6.53)	-9.4(-8.99)
1024	5.0(5.0)	-8.5(-8.33)	-8.7(-9.04)
1024(FBA)	5.0	-8.68	-8.07

表4 TSSLMS和标准LMS对脉冲压缩性能的改善

Tab.4 Pulse compression improvement of TSSLMS and standard LMS

	MLW(样本数)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
64	5.0(9.0)	-1.2(-3.12)	-15.8(-17.45)
128	5.0(6.0)	-3.7(-3.43)	-14.5(-16.02)
256	5.0(6.0)	-7.0(-3.58)	-12.4(-14.81)
512	5.0(5.0)	-7.9(-4.53)	-12.2(-14.81)
1024	5.0(5.0)	-8.3(-4.76)	-12.6(-14.53)
1024(FBA)	5.0	-8.61	-10.73

另外,由上述各表可见,MLW几乎未受到抑制RFI算法的影响。因此,本文实验中,预测误差滤波器对目标信号造成的旁瓣效应可忽略。

综合以上实验,可得出以下重要结果:(1)在基于正弦波模型的抑制RFI算法中,SBEAMLE的性能最好,GRELAX略好于ZPFFTMLE;(2)为达到最优抑制RFI效果,SBEAMLE需对消谱峰数最少,GRELAX其次,ZPFFTMLE最多;(3)GRELAX的抑制RFI速度最快,ZPFFTMLE其次,SBEAMLE需要最长的运算时间;(4)在基于AR模型的抑制RFI算法中,THNNPEF的性能最好,其在绝大多数情况下均优于Burg算法;(5)TSSLMS的性能接近THNNPEF和Burg,但其旁瓣能量较大,标准LMS与抑制RFI算法的性能要求有不小差距;(6)从总体看,基于正弦波模型的抑制RFI算法性能略好于基于AR模型的抑制RFI算法,其中GRELAX和THNNPEF十分接近。

图3和图4为运用上述算法对实测UWB-SAR接收信号的抑制RFI实验结果。目标为一 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 角反射器,系统带宽为300MHz,采样率为2GHz,接收机工作于正交解调方式。图3为RFI影响下的脉冲压缩输出,目标位于第1000样本点附近,其平均旁瓣电平约在-5dB。

图4(a)至图4(d)分别对应SBEAMLE、GRELAX、THNNPEF和TSSLMS的处理结果。其中,SBEAMLE和GRELAX的对消谱峰数设为相同值16,THNNPEF和TSSLMS的阶数均为64,脉冲压缩采用频域Hamming加窗。可见,SBEAMLE效果最好,旁瓣电平下降了10dB以上。THNNPEF和GRELAX其次,旁瓣电平平均下降了近10dB,但THNNPEF略好于GRELAX。TSSLMS性能稍差,旁瓣电平平均仅下降了7dB左右。

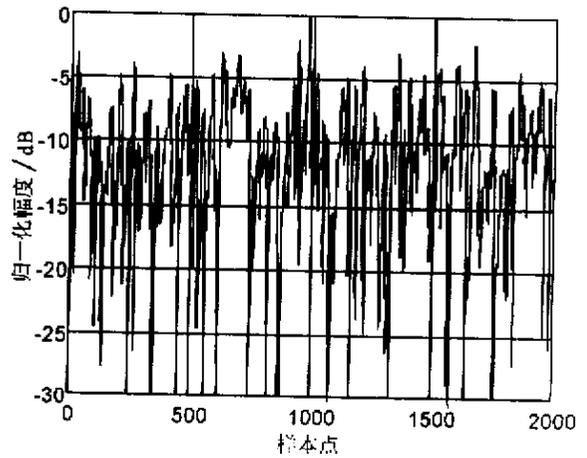


图3 受RFI干扰结果

Fig.3 Results in the presence of RFI

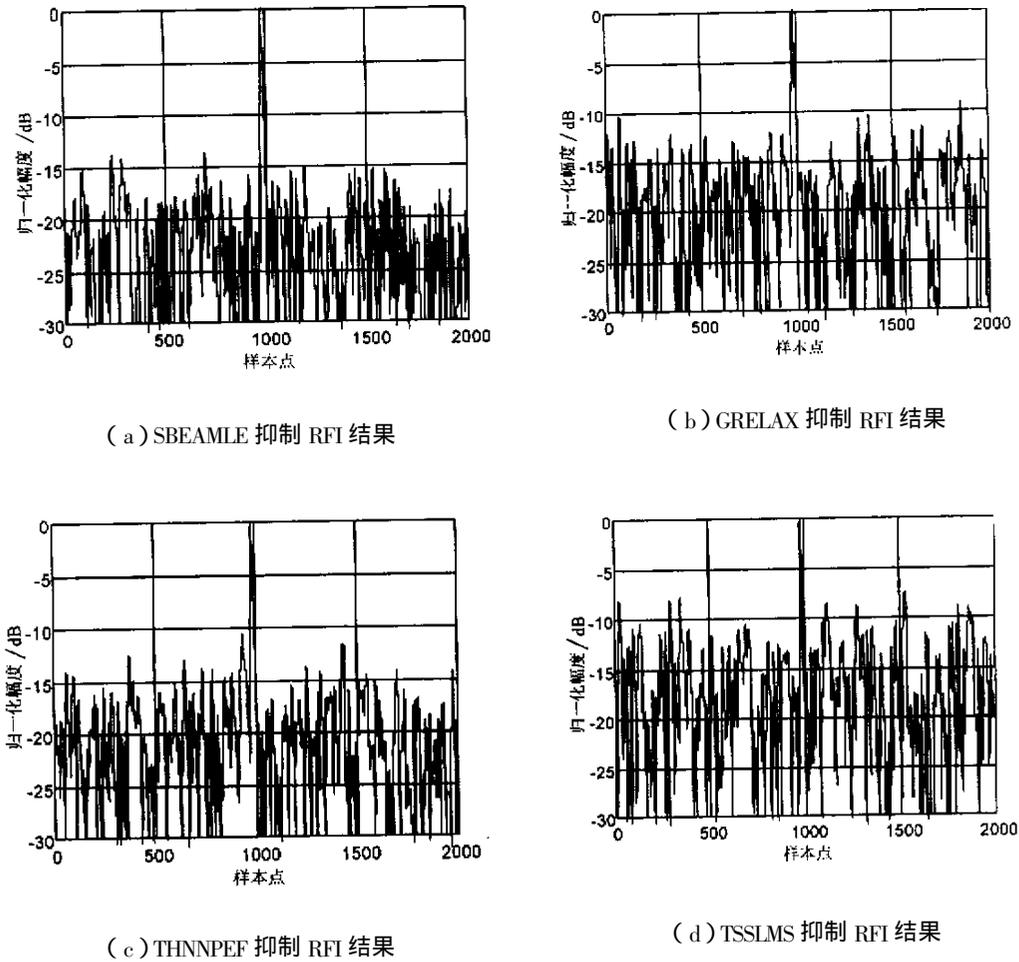


图 4 各算法的抑制 RFI 结果

Fig.4 Results of the RFI suppression algorithms

### 3 结论

从抑制 RFI 能力和脉冲压缩性能改善两个方面评估了几种主要抑制 RFI 算法的性能，并结合实测数据对其进行了测试。研究了各主要算法的抑制 RFI 能力，利用实测 RFI 数据，比较了经各算法作用后的残差功率，以干扰能量抑制比为度量，评价了各算法的抑制 RFI 程度；结合我们研制的 LFM 体制 UWB-SAR，利用实测数据，研究了各主要算法对接收信号脉冲压缩性能的改善，比较了经各算法作用前后的脉冲压缩输出，以主瓣宽度、峰值旁瓣比及积分旁瓣比为度量，评价了各算法的抑制 RFI 性能。实验表明，参数化方法是 UWB-SAR 抑制 RFI 的有效途径，实测信号的信干比均得到了不同程度的显著改善。

### 参考文献：

- [1] 黄晓涛. UWB-SAR 抑制 RFI 方法研究 [D]. 国防科技大学博士学位论文, 1999.
- [2] 黄晓涛, 梁旬农, 匡纲要. UWB-SAR 抑制 RFI 的 ML 参数估计方法 [J]. 电子与信息学报, 2001 (6): 569-576.
- [3] Huang X, Liang D. Gradual RELAX algorithm for RFI suppression in UWB-SAR [J]. IEE Electronics Letters, 1999, 35 (22): 1916-1917.
- [4] 黄晓涛, 梁旬农, 周智敏. 基于 TH 神经网络的 UWB-SAR 抑制 RFI 方法 [J]. 电子学报, 2000, 9: 23-26.
- [5] 黄晓涛, 梁旬农. UWB-SAR 抑制 RFI 的自适应滤波方法 [J]. 信号处理, 1999 (增刊): 355-358.
- [6] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight synthetic aperture radar, signal processing algorithms [M]. Artech House, Boston, London, 1995.



