

文章编号: 1001-2486 (2000) 02-0055-05

基于RELAX的UWB-SAR抑制RFI算法*

黄晓涛, 梁向农

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 在首先给出超宽带合成孔径雷达(UWB-SAR)抑制射频干扰(RFI)问题的参数化模型基础上, 从信号参数估计出发, 具体推导了实信号下RELAX算法的计算公式。针对RFI的复杂性, 提出了一种逐级RELAX算法(GRELAX)。基于仿真和实测数据的实验结果表明: GRELAX算法能够有效地抑制RFI, 并具有较快的运算速度。

关键词: 超宽带合成孔径雷达(UWB-SAR); 射频干扰(RFI); 参数估计; RELAX算法

中图分类号: TN959.3 **文献标识码:** A

RFI Suppression in UWB-SAR Based on RELAX

HUANG Xiao-tao, LIANG Dian-nong

(Institute of Electrical Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: We first present the parametric model of Radio Frequency Interference (RFI) suppression in Ultra-WideBand Synthetic Aperture Radar (UWB-SAR). Starting from the problem of signal parameter estimation, we deduce in detail the computation formula of RELAX algorithm for real-valued signal. As to the complexity of RFI, a Gradual RELAX (GRELAX) algorithm is proposed. Experiments with synthesized and raw RFI data demonstrate the efficiency of GRELAX in RFI suppression and its high processing speed.

Key words: Ultra-WideBand Synthetic Aperture Radar (UWB-SAR); Radio Frequency Interference (RFI); sinusoidal parameter estimation; RELAX

在VHF/UHF波段实现的超宽带合成孔径雷达(UWB-SAR)结合了超宽带技术与合成孔径技术, 能够对隐蔽目标(叶簇覆盖或地下的)进行探测和高分辨成像, 这类系统(冲激或线性调频体制)的发射信号带宽一般可达数百兆赫兹, 其图像分辨力可达到米级。

由于VHF/UHF波段上密布着其它无线电系统(如广播、电视或无线通信等), 其发射信号将对UWB-SAR造成射频干扰(RFI)。多数情况下, 雷达接收机中RFI信号的功率高于目标回波数十分贝, 严重影响了最终的成像质量^[1]。

目前, UWB-SAR抑制RFI方法可分为参数化方法和非参数化方法两大类, 其中参数化方法具有更强的抑制RFI能力^[1]。在对RFI和目标回波信号作一定近似的前提下, 最大似然法是最优的, 其性能十分接近C-R下界, 但其参数估计是一多维非线性优化问题, 无法直接求解。运用迭代优化技术, 可从数值上逼近问题的最优解, 并且有许多准最优方法可用来初始化迭代过程。迭代最大似然法的不足是其运算量较大, 不利于实时实现。

本文首先将UWB-SAR抑制RFI问题等效为一非线性最小二乘问题; 然后提出利用RELAX算法将多维优化问题转化为一系列简单的一维优化问题, 并推导了实信号下的一维优化解; 针对实际RFI信号的复杂特性, 提出了RELAX算法的逐级实现形式——GRELAX算法; 最后, 通过仿真和实测数据验证了GRELAX算法抑制RFI的有效性。

* 收稿日期: 1999-08-14

基金项目: 国家重点预研项目资助

作者简介: 黄晓涛(1972-), 男, 博士生。

1 UWB-SAR 抑制 RFI 的参数化模型

由于 RFI 具有窄带特性, 而 UWB-SAR 目标回波为宽带信号, 因此, 抑制 RFI 可以通过窄带信号的参数建模与估计来实现。许多传统的信号处理方法几乎都集中于白噪声背景下窄带信号的估计问题, 对于 UWB-SAR, 在很大程度上, 目标回波和系统噪声可近似为白噪声, 而 RFI 信号可近似为许多窄带信号的迭加。这样, 可先利用传统方法估计 RFI, 然后从雷达接收信号中减去, 完成对 RFI 的抑制。图 1 为基于上述思想的 RFI 抑制器框图。

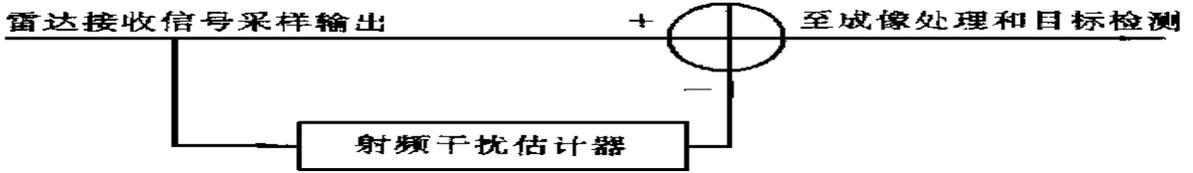


图 1 基于估计-相减思想的 RFI 抑制器框图

Fig. 1 RFI Suppression framework based on the idea of estimate-subtract

考虑到 RFI 的存在, UWB-SAR 接收信号 (实信号) 经采样后可写为:

$$x(n) = s(n) + i(n) + w(n), \quad n = 0, \dots, N - 1 \quad (1)$$

其中, $s(n)$ 为目标回波, $i(n)$ 为 RFI, $w(n)$ 为系统噪声, N 为一个回波脉冲的样本数。

假定 RFI 满足如下参数模型:

$$i(n) = \sum_{k=1}^p a_k \cos(2\pi f_k n + \varphi_k) \quad (2)$$

其中, a_k 为第 k 个余弦信号的幅度, f_k 和 φ_k 分别为其频率和相位, p 为余弦信号个数。

于是, (1) 式可写为:

$$x(n) = \sum_{k=1}^p a_k \cos(2\pi f_k n + \varphi_k) + z(n) \quad (3)$$

其中, $z(n) = s(n) + w(n)$ 。

由 $x(n)$ 估计出 a_k, f_k, φ_k , 便得到 RFI 的估计 $\hat{i}(n)$, 抑制 RFI 后的输出为:

$$y(n) = x(n) - \hat{i}(n) \quad (4)$$

基于 (3) 式, 抑制 RFI 问题可转化为一非线性最小二乘问题。

在这类参数估计算法中, 最大似然法最接近 C-R 下界, 但效率很低, 其求解为一复杂的多维搜索过程, 且对初始估计很敏感; 而 RELAX 算法通过将这一多维搜索过程分解为一系列一维搜索过程, 大大简化了估计困难。

2 基于 RELAX 的 UWB-SAR 抑制 RFI 算法

2.1 实信号 RELAX 算法

复信号下的 RELAX 算法计算公式可参见文献 [2]。在实信号情况下, 需对其作修正, 否则算法将发散。对 (3) 式, 假定 p 已知, 则 $\{a_k, f_k, \varphi_k\}_{k=1}^p$ 的最大似然估计问题可写为:

$$\min_{\{a_k, f_k, \varphi_k\}} \left\{ \left\| \mathbf{x} - \sum_{k=1}^p \mathbf{W}(f_k) \mathbf{b}_k \right\|^2 \right\} \quad (5)$$

其中, $\|\cdot\|$ 为 Frobenius 范数, $\mathbf{x} = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$, $\mathbf{b}_k = \left[\frac{a_k e^{j\varphi_k}}{2}, \frac{a_k e^{-j\varphi_k}}{2} \right]^T$, $\mathbf{W}(f_k) = [\omega(f_k), \omega(-f_k)]$, 而 $\omega(f_k) = [1, e^{j2\pi f_k}, \dots, e^{j2\pi f_k(N-1)}]^T$, T 表示转置。

对于某分量 k , 令:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x} - \sum_{i=1, j \neq k}^p \mathbf{W}(f_i) \hat{\mathbf{b}}_i \quad (6)$$

则 (5) 式简化为:

$$(\hat{\mathbf{b}}_k, \hat{f}_k) = \arg \min_{(\mathbf{b}_k, f_k)} \|\mathbf{x}_k - \mathbf{W}(f_k) \mathbf{b}_k\|^2 \quad (7)$$

于是有:

$$\hat{\mathbf{b}}_k = [\mathbf{W}^H(f_k) \mathbf{W}(f_k)]^{-1} \mathbf{W}^H(f_k) \mathbf{x}_k \quad (8)$$

$$\hat{f}_k = \arg \min_{f_k} \{\mathbf{I} - \mathbf{W}(f_k) [\mathbf{W}^H(f_k) \mathbf{W}(f_k)]^{-1} \mathbf{W}^H(f_k)\} \mathbf{x}_k^2 \quad (9)$$

将 $\mathbf{W}(f_k) = [\omega(f_k), \omega(-f_k)]$ 分别带入 (8) 和 (9) 式得:

$$\hat{f}_k = \arg \max_{f_k} \omega^H(f_k) \mathbf{x}_k^2 \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{a}}_k = \frac{2}{N} \omega^H(\hat{f}_k) \mathbf{x}_k \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{Q}}_k = [\omega^H(\hat{f}_k) \mathbf{x}_k] \quad (12)$$

这里利用了 $\omega(-f_k) = \omega(2\pi - f_k)$ 、 $\omega^H(f_k) \mathbf{x}_k = (\omega^H(2\pi - f_k) \mathbf{x}_k)^*$ 及近似公式: $\omega^H(f_k) \omega(-f_k) = 0$, 其中, \cdot 为取相位运算, $*$ 为共轭符号。

于是, 可得到实信号 RELAX 算法步骤:

- (1) 令 $p = 1$, 利用 (10)、(11) 和 (12) 式, 由 \mathbf{x} 计算 \hat{f}_1 、 $\hat{\mathbf{a}}_1$ 和 $\hat{\mathbf{Q}}_1$;
- (2) 令 $p = 2$: (1) 由 (6) 式计算 \mathbf{x}_2 , 由上述三式计算 \hat{f}_2 、 $\hat{\mathbf{a}}_2$ 和 $\hat{\mathbf{Q}}_2$,
(2) 利用 \hat{f}_2 、 $\hat{\mathbf{a}}_2$ 和 $\hat{\mathbf{Q}}_2$ 计算 \mathbf{x}_1 , 再由上述三式计算 \hat{f}_1 、 $\hat{\mathbf{a}}_1$ 和 $\hat{\mathbf{Q}}_1$,
重复 (1)、(2) 直至收敛^[2];
- (3) 余下步骤: 增大 p 直至达到其真值或估计值。

进一步再讨论 $\hat{f}_k = 0$ 的特殊情况。当 $f_k = 0$ 时, (8) 和 (9) 式中的矩阵:

$$\mathbf{W}^H(f_k) \mathbf{W}(f_k) = \begin{bmatrix} N & N \\ N & N \end{bmatrix} \quad (13)$$

显然, 上述矩阵是奇异的, 此时不能直接用 (11) 和 (12) 式计算 $\hat{\mathbf{a}}_k$ 和 $\hat{\mathbf{Q}}_k$ 。

观察 (7) 式, 将 $\hat{f}_k = 0$ 带入并化简得:

$$\hat{\mathbf{a}}_k \cos(\hat{\mathbf{Q}}_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) = \frac{1}{N} \omega^H(0) \mathbf{x}_k \quad (14)$$

由 (14) 式可见, $\hat{\mathbf{a}}_k$ 和 $\hat{\mathbf{Q}}_k$ 并不唯一, 不妨设 $\hat{\mathbf{Q}}_k = 0$, 也即 (12) 式的估计结果, 则:

$$\hat{\mathbf{a}}_k = \frac{1}{N} \omega^H(0) \mathbf{x}_k \quad (15)$$

综上所述, 当 $\hat{f}_k = 0$ 时, (11) 式右端需乘以 $\frac{1}{2}$, $\hat{\mathbf{Q}}_k$ 仍可用 (12) 式计算。

2.2 UWB-SAR 抑制 RFI 的 GRELAX 算法

在 UWB-SAR 实际工作环境中, RFI 的成分通常很复杂, 雷达接收信号中将有大量的窄带干扰存在, 其数目一般可达几十甚至上百个, 即 (2) 式的 p 很大。在此情况下若直接运用上述 RELAX 算法, 将导致计算量巨大并影响算法收敛。针对这一问题, 本文提出逐级运用 RELAX 算法的思想 (GRELAX): 将处理过程分为若干级, 在每一级限定较小的 p 运用 RELAX 算法。这样尽管损失了一部分估计精度 (后面将看到损失很小), 但却更适于在实际环境中可靠工作, 且运算量大大降低。GRELAX 的具体步骤如下:

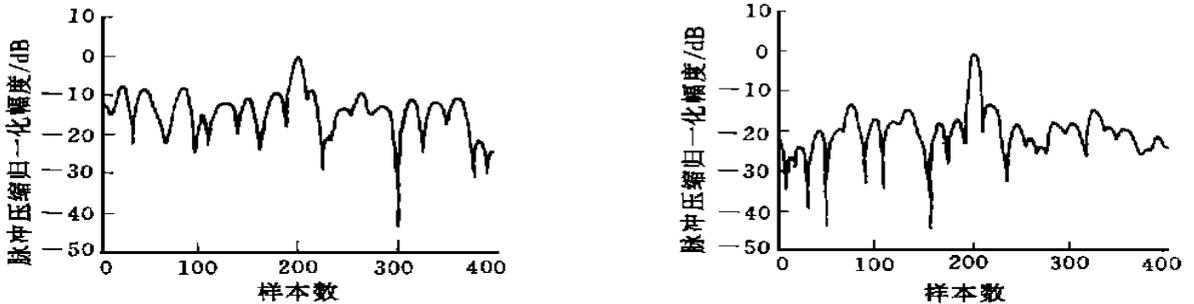
- (1) 给定每级中待处理的余弦信号个数 $p = M$ 和总级数 L ;
- (2) 将观测 $\mathbf{x} = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$ 作为 RELAX 算法的初始输入信号;
- (3) 在 $p = M$ 下, 运用 RELAX 算法估计出余弦信号参数;
- (4) 由 3) 中得到的参数合成本级相应的 RFI 估计, 并将其从本级的输入信号中减去, 以残差作为下一级的输入信号;
- (5) 重复 3) 和 4) 直至达到给定级数 L 。

GRELAX 对标准 RELAX 运算量的改善比约为^[3] $\frac{K+1}{M+1}$, 其中, M 和 L 如 GRELAX 步骤中定义, $K = ML$ 为处理的余弦信号总个数。

3 实验结果

对于多个理想实余弦信号和实测 RFI 信号, GRELAX 和 FFTMLE^[4] 的估计残差功率与信噪比和对消谱峰个数的关系已由文献 [3] 作了比较, 在此不多重复, 以下着重分析其对 UWB-SAR 接收信号脉冲压缩结果的改善。

在实测 RFI 信号中加入一理想线性调频信号作为 UWB-SAR 接收信号, 信干比 SIR = -10 dB。图 2 为 GRELAX 对上述混合信号脉冲压缩 (汉明加权) 结果的改善。各参数为 $N = 1024$, $K = 64$, $M = 2$ 。脉冲压缩最大输出位于第 200 样本点处。图 2 (a) 为抑制 RFI 前的结果, 其峰值旁瓣约为 -8.6 dB, 图 2 (b) 为 GRELAX 作用后的结果, 可见, 峰值旁瓣下降了 5 dB 左右, 且旁瓣能量亦大大降低。表 1 比较了 $K = 16$ 和 $K = 64$ 时脉冲压缩的几项指标^[5] (第一列括号中为 K 值), 抑制 RFI 算法采用 FFTMLE 和 GRELAX, 各参数同前。 $K = 16$ 时, 脉冲压缩改善不大, GRELAX 的各项指标略高于 FFTMLE; 而 $K = 64$ 时, 峰值旁瓣和积分旁瓣比改善明显, FFTMLE 略好于 GRELAX。



(a) 抑制 RFI 前

(b) 抑制 RFI 后

图 2 GRELAX 对脉冲压缩结果的改善

Fig. 2 Improvement of pulse compression by GRELAX

表 1 抑制 RFI 算法对脉冲压缩结果的改善

Tab. 1 Improvement of pulse compression by RFI suppression algorithms

	主瓣高度	主瓣宽度	峰值旁瓣 (dB)	积分旁瓣比
抑制 RFI 前	280.2342	7	- 8.6076	0.0776
FFTMLE (16)	268.9062	7	- 7.2928	0.0999
FFTMLE (64)	187.5815	7	- 15.0884	0.4489
GRELAX (16)	286.3343	7	- 9.2716	0.1431
GRELAX (64)	180.9282	7	- 13.6698	0.3806
理想情况	278.0307	7	- 44.8192	1.8118

4 结论

从 UWB-SAR 抑制 RFI 技术的参数化方法入手, 基于信号参数估计的 RELAX 算法, 具体推导了其在实信号情况下的计算公式。针对抑制 RFI 问题中干扰个数多的特点, 提出逐级运用 RELAX 的 GRELAX 算法, 尽管其估计精度相对标准 RELAX 算法略有损失, 但所需运算量大大降低。计算机仿真和实测数据分析的结果表明, GRELAX 算法能有效地抑制 RFI 并具有较快的处理速度。

参考文献:

- [1] Braunstein M et al. Signal Processing Approaches to Radio Frequency Interference (RFI) Suppression [J]. SPIE vol. 2230. 1994: 190-208.
- [2] Li J and Stoica P. Efficient Mixed-Spectrum Estimation with Application to Target Feature Extraction [J]. IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 44, No. 2, Feb. 1996, 44 (2): 281-295.
- [3] Huang X and Liang D. Gradual RELAX Algorithm for RFI Suppression in UWB-SAR. Electronics Letters, Vol. 35, No. 22, October 1999. 35 (22): 1916-1917.
- [4] Ulug B. An Algorithm for Sinusoidal Interference Reduction Using Iterative Maximum Likelihood Estimation Techniques. Master's Thesis, Ohio State University, March 1992.
- [5] Carrara W G, Goodman R S and Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar, Signal Processing Algorithms. Artech House, Boston, London, 1995.