

文章编号: 1001-2486(2009)03-0065-05

## 基于小波变换的探地雷达随机 RFI 抑制方法\*

陆珉, 李禹, 黄春琳, 粟毅

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 针对探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)与移动通信系统终端存在的频谱共用的电磁兼容性问题,着重分析了 GPR 接收中随机性射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)的性质,以及该类 RFI 与 GPR 目标回波信号在小波多尺度分解中分布的差异性,并基于此分析,提出了基于小波变换域的 GPR 随机 RFI 抑制算法,利用两种实测实验数据进行验证,结果表明,该方法能较好地抑制 GPR 的随机性 RFI。

**关键词:** 探地雷达; 射频干扰; 小波变换; Lipschitz 指数

**中图分类号:** TNP951 **文献标识码:** A

## Method of Random RFI Suppression for GPR Based on Wavelet

LU Min, LI Yu, HUANG Chun-lin, SU Yi

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

**Abstract:** Due to the frequency sharing, Electro Magnetic Compatibility between GPR and Mobile Telephone System is crucial. In the current study, the properties of the random RFI signal received by GPR are analyzed in detail, and the differences between the random RFI and target signal are presented in wavelet field. Furthermore, the method of random RFI suppression based on wavelet transform is proposed. Additionally, the two types of data are collected to validate the performance of the method. Finally, the experimental results prove the effectiveness of the method.

**Key words:** ground penetrating radar (GPR); radio frequency interference (RFI); wavelet transform; Lipschitz exponent

探地雷达是一种利用电磁波来探测地下隐蔽目标的有效工具。地下介质的不连续性,导致其后向散射回波发生突变,基于这一机理,GPR 可以检测和识别地下未知目标。由于常工作于 100~3000MHz 频段范围<sup>[1-2]</sup>,在对机场、高速公路和建筑等城市物体进行探测时,GPR 将处于很复杂的电磁干扰环境中,接收的回波信号中包含多种射频干扰,主要有调频广播电台、电视,以及通信终端设备等系统的发射信号。其中,移动通信设备终端(如 GSM 手机)的发射信号具有较大的瞬时功率,对 GPR 探测结果有较大影响,甚至造成接收机的饱和而无法正常工作。移动通信设备终端的发射信号具有窄脉冲波形,其在时间和频率上都有很强的非平稳性和随机性,因此常用的正弦信号对消法、频域陷波法等<sup>[2-4]</sup>都难以有效去除。本文针对 GPR 这一类随机性 RFI,提出了一种基于小波变换的抑制算法。

## 1 随机 RFI 和 GPR 目标回波信号的小波变换特性分析

根据不同的扫描方式,探地雷达的回波数据可以表示为两种形式:A-scan 和 B-scan。当 GPR 天线固定在某一个固定位置时,接收到的一组不同延的回波信号,通常称为 A-scan 数据,其表达式为

$$f_A(z) = f(x, y, z) | x = x', y = y' \quad (1)$$

其中  $x = x', y = y'$  表示设定的位置坐标;  $z = 1, 2, \dots, N$ , 表示一维距离向的采样点数。B-scan 数据是由若干个一维的 A-scan 数据水平排列组成。针对 A-scan 的回波数据,可以构建以下回波模型:

$$f(t) = d(t) + s(t) + n(t) \quad (2)$$

式中,  $s(t)$  是目标的反射回波,  $d(t)$  代表系统的直达波和直耦波,  $n(t)$  是各种随机噪声和外界电磁波的

\* 收稿日期: 2009-02-09

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2008AA12Z117)

作者简介: 陆珉(1976-), 男, 讲师, 博士生。

射频干扰等。本文主要针对  $n(t)$  中的随机 RFI 进行抑制。

GPR 接收回波中的 RFI 主要包括调频广播电台、电视产生的时域上连续的射频干扰和 GSM 移动通信系统终端产生的时域上不连续的射频干扰。前者有比较稳定的频点、平均功率和瞬时功率,但平均功率和瞬时功率相对较小,该类信号的振幅远小于目标回波信号的振幅,对 GPR 系统性能影响较小。移动通信终端发射信号的平均功率也较小,但其瞬时干扰功率可高达 7dBmW,将对 GPR 探测结果有较大影响,甚至造成接收机的饱和而无法正常工作。同时,在具体的探测过程中,移动通信设备的终端距离 GPR 系统的相对距离较小,而调频广播电台和电视系统距离 GPR 较远。移动通信终端设备发射的信号将是 GPR 在城市工作环境中的主要 RFI。

GSM 移动通信系统的频段也有限定,但 GSM 在限定的频段内采用动态信道分配方法,即系统根据当前的业务负载和干扰情况,动态地将频段内的随机信道(频率和时隙)分配给所需用户。因此,就单个 GSM 手机而言,其发射和接收信号在时间和频率上是随机的。图 1 给出了 GPR 的目标回波信号和 GSM 通信终端产生的发射信号,其中 GPR 的目标回波在整个采样时窗内都连续存在,而 GSM 终端产生的信号仅具有窄脉冲波形,时宽大约 0.6ns,并且在每一个采样时窗中的位置也是随机分布的。

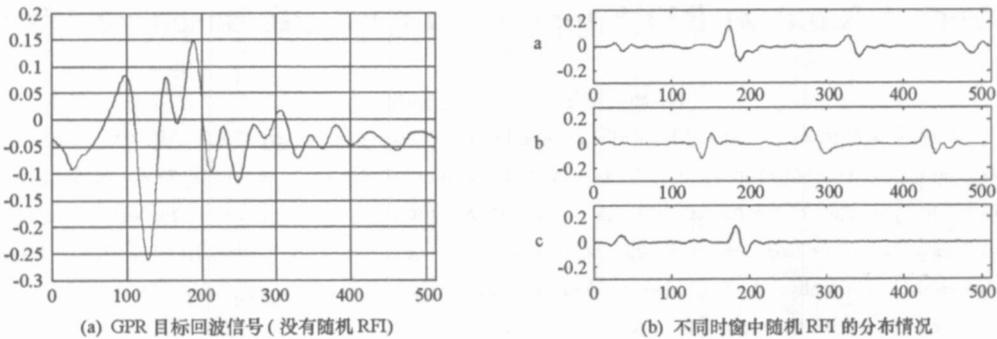


图 1 GPR 接收的部分回波信号  
Fig. 1 Some signals of GPR

小波变换具有敏感的变焦特征,它能形成一个可调时频窗,使得对被分析信号的低频段具有高的频率分辨力,对高频段具有高的时间分辨力;同时利用小波的多分辨率理论可将信号所携带的信息分解到任意细节加以分析。由于连续信号与窄脉冲干扰在小波变换下的细节信息具有截然不同的分布特征,能很容易地区分信号和窄脉冲干扰,进而抑制随机性 RFI。

对连续信号  $f(x) \in L^2(R)$  作离散二进制小波变换,并取二进小波为

$$\Psi_s(t) = \frac{1}{s} \Psi\left(\frac{t}{s}\right) \quad (3)$$

式中,  $\Psi(t)$  是小波基函数,尺度参数  $s = 2^j (j \in \mathbf{Z})$ ,  $f(x)$  的离散二进小波变换为

$$Wf(x) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{x-t}{s}\right) dt \quad (4)$$

小波变换具有把函数局部性规律表征出来的优点,通常以奇异性指数  $\alpha$  来度量<sup>[5]</sup>,又称为 Lipschitz 指数,以反映信号的不规则程度。若  $x \in \mathcal{X}_0$ , 满足

$$|f(x) - f(x_0)| \leq k \cdot |x - x_0|^\alpha \quad (5)$$

其中,  $\mathcal{X}_0$  为  $x_0$  的开邻域,  $k$  为常数,则称  $f(x)$  在  $x_0$  处 Lipschitz 指数为  $\alpha$ ,  $\alpha$  越大,函数越光滑。此定义是对  $f(x)$  在一点  $x_0$  处而言,可以扩展到一段区间  $[x_1, x_2]$ 。即当  $x$  和  $x_0$  都在区间  $[x_1, x_2]$  内,且处处满足式(5)条件时,称  $f(x)$  在此区间  $[x_1, x_2]$  为均匀的 Lipschitz  $\alpha$ ,并且有以下的性质:

对  $\forall x \in [x_1, x_2]$ ,

$$|Wf(x)| \leq K \cdot s^\alpha \quad (6)$$

$$\lg |Wf(x)| \leq \lg K + a \lg s \quad (7)$$

其中,  $K$  是一个与  $\Psi(t)$  有关的常数,  $\lg K$  也是常数。如果信号  $f(x)$  在  $[x_1, x_2]$  上的奇异指数  $\alpha$  大于零, 则由式(7)知: 随着尺度  $s$  的增加, 小波变换的模极大值变大; 但若信号具有负的奇异性指数  $\alpha$ , 则情况相反, 随着尺度  $s$  的增加, 小波变换的模极大值将变小。因此, 小波变换的奇异性指数  $\alpha$  能反映小波变换的模极大值随尺度  $s$  的变化趋势。通常, 连续信号具有正的奇异性指数  $\alpha$ ; 冲激函数具有负的奇异性指数,  $\alpha = -1$ ; 白噪声的奇异性指数  $\alpha = -0.5 - \varepsilon$  ( $\varepsilon > 0$ ); 窄脉冲具有类似于冲激函数的奇异性指数。

依据式(6)、式(7)可知, 随着二进尺度  $s = 2^j$  ( $j \in \mathbf{Z}$ ) 的增加, 脉冲干扰的小波变换模极大值幅度及模极大值稠密度将逐渐减小, 并且其模极大值随尺度的递增以半数减少。相反, 对应于连续信号的小波变换模极大值则随着变换尺度的增加而增加, 从而在各尺度上表现出与窄脉冲干扰截然不同的形态特征。

## 2 基于小波变换的 GPR RFI 抑制算法

针对 GPR 中的目标回波信号与随机性 RFI, 上一节分别讨论两者的奇异性指数和对应的小波系数分布特性。作为连续信号的目标回波具有正的奇异性指数  $\alpha$ , 而随机性 RFI 具有负的奇异性指数,  $\alpha = -1$ 。因此, 在小波变换的多尺度分解中, 随机性 RFI 主要集中在小尺度上的小波系数分量中, 而且随尺度的增加, 其模极大值和模极大值分布的密度迅速减小; 目标回波信号则相反, 主要分布在较大的尺度分量中。利用这种差异性可以进行 B-Scan 方位向的多尺度空间选通滤波, 完成对随机 RFI 的抑制。

GPR 的 B-Scan 数据是系统沿着指定的扫描路线获取的地下目标回波按位置排列的二维时间—距离曲线; 对于均匀的介质而言, B-Scan 方位向的数据  $y(x)$  相当于同一深度处介质的反射回波, 该回波能清晰地反映介质在 B-Scan 方位向的突变特征。由于随机性 RFI 在 A-Scan 的采样时窗中随机分布, 其不同测量位置的同一采样时刻基本上不会连续出现, 即在 B-Scan 方位向的数据  $y(x)$  中不会连续出现, 且通常表现为宽度为一个单位尖脉冲, 因此可知, 随机性 RFI 在  $y(x)$  中类似于冲激  $\delta(n)$ , 其 Lipschitz 指数  $\alpha = -1$ 。而处于同一深度的均匀介质具有连续的电磁特性, 使反射回波呈现平稳性; 即使在该深度上有异常物(常常是目标), 其回波也将是跨度很大的波峰和波谷, 而不会表现为窄脉冲形状。B-Scan 中随机性 RFI 的小波系数主要集中在最小尺度上, 这与均匀介质界面的反射回波以及异常物(目标)的反射回波在各尺度上的特性截然不同, 也可以用选通滤波算法进行去除。

对  $y(x)$  用 Mallat 快速算法<sup>[6]</sup> 计算  $y(x)$  在各尺度  $s = 2^j$  ( $j \leq J, J = 5$ ) 上的近似值  $S_{sy}(2^j, k)$  和小波变换  $W_{sy}(2^j, k)$ , 其中  $h_{0,l-2k}$  和  $h_{1,l-2k}$  为分解时对应的离散滤波器系数。

$$\begin{cases} S_{sy}(2^j, x) = \sum_{l \in \mathbf{Z}} h_{0,l-2k} \cdot S_{sy}(2^{j-1}, l) \\ W_{sy}(2^j, x) = \sum_{l \in \mathbf{Z}} h_{1,l-2k} \cdot S_{sy}(2^{j-1}, l) \end{cases} \quad (8)$$

由于随机性 RFI 在  $y(x)$  中表现为冲激函数, 其小波系数主要集中在最小尺度上, 所以针对最小尺度上的小波系数进行处理。利用式(9)可得重构的信号  $\hat{y}(j=1, k)$ ; 重构时将其他尺度上的小波系数置零, 以减少较大尺度上低频分量(主要是介质或目标)的影响, 其中  $g_{0,l-2k}$  和  $g_{1,l-2k}$  为重构时对应的滤波器系数。

$$S_{sy}(2^{j-1}, l) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} g_{0,l-2k} \cdot S_{sy}(2^j, k) + \sum_{k \in \mathbf{Z}} g_{1,l-2k} W_{sy}(2^j, k) \quad (9)$$

对重构信号  $\hat{y}(j=1, k)$  做自相关运算,

$$Cor(j=1, k) = \hat{y}(j=1, k) \cdot \hat{y}(j=1, k) \quad (10)$$

式(10)的相关计算锐化和增强了随机性 RFI 边缘, 从而便于对随机 RFI 区域进行选通。

设定阈值  $T_1 = C_1 \cdot \max(Cor(j=1, k))$ ,  $C_1$  是调节系数, 根据脉冲干扰的模极大值随尺度的递增以半数减少的特性, 设定  $C_1 = 0.5$ 。由此可确定随机 RFI 所在的位置:

$$Z_1 = \begin{cases} k, & Cor(j=1, k) \geq T_1 \\ 0, & Cor(j=1, k) < T_1 \end{cases} \quad (11)$$

设定选通窗的宽度为  $2L_1 + 1$ , 在上述各选通位置  $Z_1$  上, 将已确定的选通位置扩展为选通区域, 其中  $L_1$  由 B-Scan 方位向的冲激干扰宽度确定, 则有

$$\hat{H}_{mask}(k) = \begin{cases} 0, & |k - Z_1| \leq L_1 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

相邻尺度的小波系数经过了二抽取的过程, 故需要将  $\hat{H}_{mask}(k)$  在各尺度依次进行二抽取, 并加零补偿至与该尺度上小波系数相同的长度。

$$H_{mask}(j, n) = \begin{cases} \hat{H}_{mask}(2^j \cdot n), & 2^j \cdot n \leq N \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad n = 1, 2, \dots, N_j \quad (13)$$

式中,  $N_j$  为各尺度上小波系数的长度 ( $j = 1, 2, \dots, J$ )。

利用各尺度上的选通滤波器对 GPR 接收信号的小波系数进行选通, 可得新的小波系数

$$\hat{W}_{sy}(2^j, k) = W_{sy}(2^j, k) \cdot H_{mask}(j, n) \quad (14)$$

由于连续信号的模极大值在各尺度上具有传递特性, 并在各尺度的相应位置上有集中的幅度, 因此应该在各尺度上建立空间选通滤波器, 以将目标回波信号在各尺度上的小波系数尽可能多地选通保留。式(14)可以实现上述操作, 同时又去除最小尺度上随机性 RFI 的小波系数。这样由新的各尺度小波系数  $\hat{W}_f(2^j, k)$  重构信号, 可以得到去除随机性 RFI 的 B-Scan 数据, 其中重构公式为:

$$S_{sy}(2^{j-1}, l) = \sum_{k \in Z} g_{0, l-2k} \cdot S_{sy}(2^j, k) + \sum_{k \in Z} g_{1, l-2k} \hat{W}_{sy}(2^j, k) \quad (15)$$

### 3 实验和性能分析

本实验采用一实验性 GPR 系统, 系统发射机的中心频率为 1GHz, 带宽约为 1GHz, 发射信号的时宽在 0.4ns 左右, 所选用采样时窗为 20ns。利用该 GPR 分别对沙坑中金属目标和建筑物中的人进行探测。沙坑中的目标为直径 8cm、长约 30cm 的金属管, 距沙坑表面 10cm。建筑的墙壁为普通砖块混凝土结构, 约 25cm 厚, 人在建筑物内距离墙壁 1m 的地方走动。射频干扰信号是离天线 1m 距离的 2 个 GSM 手机呼叫时的发射信号。由于 GSM 手机距离 GPR 天线较近, 天线接收的手机信号功率远大于广播和电视信号的功率, 所以对该实验系统主要考虑抑制 GSM 手机产生的随机性 RFI。

图 2 给出了沙坑实验中接收的回波数据及其随机 RFI 抑制的效果, 其中图 2(a) 是 B-Scan 原始数据的三维显示效果图, 图中可以明显看到, 在多数 A-Scan 数据中都随机出现尖峰, 该尖峰主要是由 GSM 手机发射信号产生的; 图 2(b) 是本文算法对随机性 RFI 抑制后的处理结果, 显然, 图中各道数据中的尖峰干扰已被有效地消除。

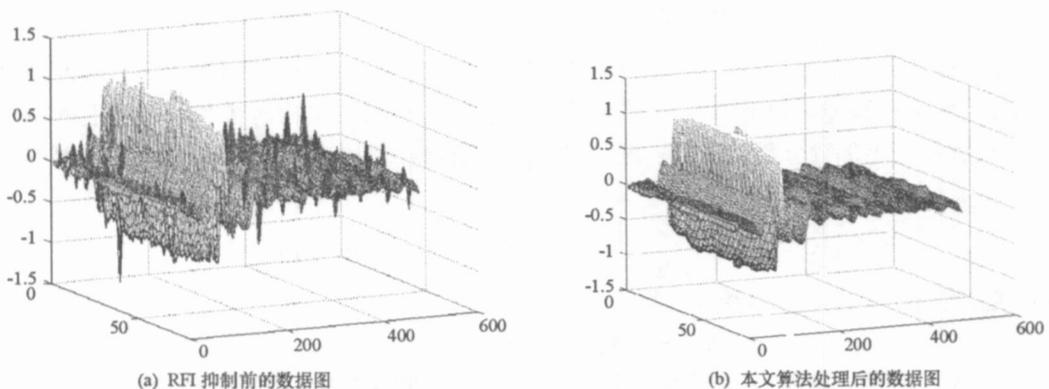


图 2 沙坑实验的回波数据及其 RFI 抑制结果  
Fig. 2 Data of bunker test and the one with RFI suppression

利用该实验型 GPR 也可以对建筑物中隐藏的人进行探测, 实验结果见图 3。图 3(a) 是 GPR 接收的回波数据, 其中由于存在直达波和耦合波等强分量, 所以动目标(人)的回波信号和随机的 RFI 都被掩

盖。图 3(b) 是上述直达波和耦合波等强分量被对消后的实验结果, 动目标的回波信号被凸现出来, 但仍有很多强 RFI 信号。图 3(c) 给出了该实验中同步接收随机性 RFI 的分布情况, 这种随机的亮条和亮斑将会影响目标的检测, 增大了雷达的虚警概率。采用本文的随机 RFI 抑制算法, 结果见图 3(d), 其中随机性的 RFI 已经被有效地抑制, 目标回波信号的信噪比得到了提高。

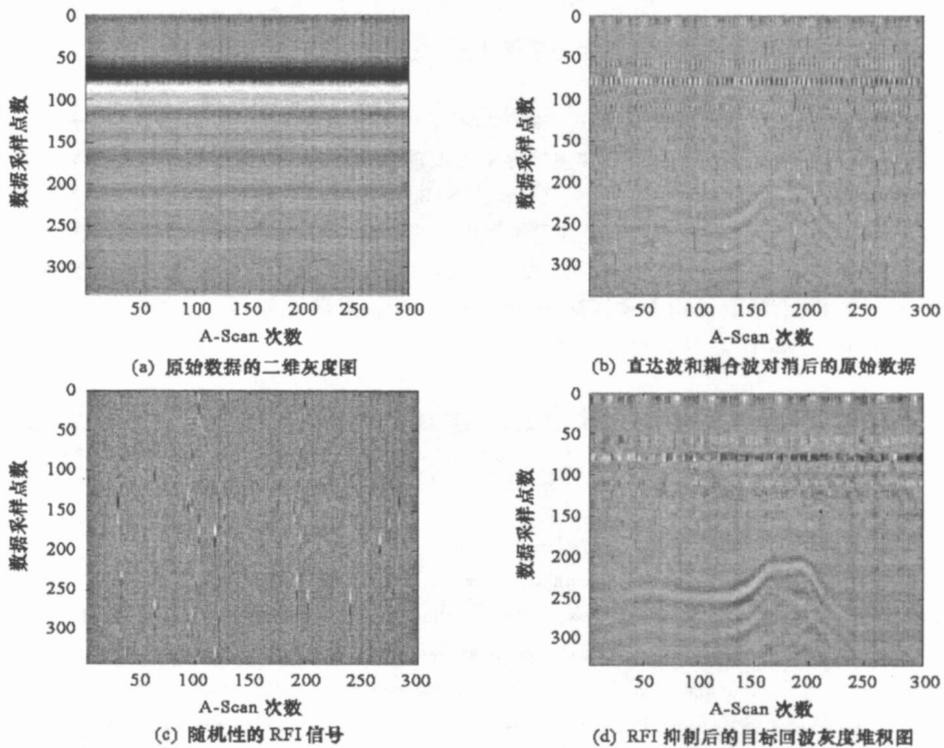


图 3 穿墙实验的回波数据及其 RFI 抑制结果

Fig. 3 Data of through wall test and the one with RFI suppression

## 4 结论

探地雷达与移动通信系统存在频谱共有的电磁兼容问题。当探地雷达在对城市环境中的机场、公路和建筑等对象进行探测时, 其接收回波中包含移动通信终端设备(如 GSM 手机)的发射信号, 将形成 RFI。本文对上述类型的 RFI 进行特性分析, 指出该类 RFI 具有窄脉冲波形, 其在时间和频率上都有很强的非平稳性和随机性。然后, 在小波域比较了该随机 RFI 与探地雷达目标回波信号在不同分解尺度上分布特性的差异, 并基于此差异提出了基于小波变换的探地雷达随机 RFI 抑制算法。文中利用两类实测数据进行随机 RFI 的抑制处理, 结果表明本文算法能有效地抑制探地雷达的随机 RFI。

## 参考文献:

- [1] 栗毅, 黄春琳, 雷文太. 探地雷达理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 李禹, 黄春琳, 栗毅. 基于 MSE 准则抑制 SPR 射频干扰的方法[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(4): 42- 46.
- [3] Miller T, Potter L, McCorkle J. RFI Suppression for Ultra Wideband Radar[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(4): 1142 - 1156.
- [4] Abend K, McCorkle J. Radio and TV Interference Extraction for Ultra-wideband Radar Receivers[C]//SPIE, 1995, 2487: 119- 129.
- [5] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets [J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1992, 38(2): 617- 643.
- [6] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.