

文章编号: 1001-2486(2007)03-0085-04

## 混沌信号在超宽带穿墙成像雷达中的应用\*

刘培国, 刘继斌, 李高升, 周蔚红, 张 婷

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:**分析了基于混沌信号的超宽带穿墙雷达的性能。对目标的成像显示采用混沌信号的超宽带雷达,具有良好的距离分辨率和旁瓣压缩能力,其性能优于时间调制的超宽带(TMUWB)雷达。采用时域有限差分方法(FDTD)进行了电磁仿真。

**关键词:**超宽带;混沌信号;成像雷达;时域有限差分方法

**中图分类号:**TN956 **文献标识码:**B

## Analysis for Chaos Used in UWB Imaging Radar

LIU Pei-guo, LIU Ji-bin, LI Gao-sheng, ZHOU Wei-hong, ZHANG Ting

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

**Abstract:** A novel chaos based pulse amplitude modulated ultra-wide band (CPAMUWB) imaging radar was presented. The proposed radar has good range resolution and excellent range side lobe suppression characteristics that enhance its imaging performance, better than that of the conventional time modulated UWB (TMUWB) radars in reducing false alarms. Numerical electromagnetic (EM) simulations using finite difference time domain (FDTD) method illustrate the definite advantages of the proposed radar under different scenarios.

**Key words:** ultra-wide band; chaos; imaging radar; FDTD

由于消防救护和反恐的需求,穿墙探测雷达研究引起了人们的极大兴趣<sup>[1-2]</sup>。穿墙探测雷达通过成像判断房间内的情况,从而为人员定位、搜救应用提供可靠的信息。一般的窄带信号很难达到所需的距离分辨率,所以穿墙雷达应用超宽带信号。超宽带雷达用于探地(GPR)和穿透探测已经取得了很大成功<sup>[3-4]</sup>。为了实现良好的穿透功能,这类雷达一般采用频率相对较低的超宽带信号,形式多为冲激脉冲,如高斯脉冲、单周波等<sup>[5-6]</sup>。

将高斯脉冲的混沌幅度调制超宽带(CPAMUWB)信号应用于穿墙探测,可以实现良好的距离分辨率。文章分析了混沌序列的产生、波形、距离压缩等特性以及成像处理,比较了混沌序列与时间调制序列的成像结果,给出了穿墙探测的仿真结果和结论。

### 1 混沌序列的产生和接收

雷达发射信号为混沌幅度调制高斯脉冲序列,即脉冲幅度由 Chebyshev 混沌调制,混沌参数选择为 2,信号如图 1 所示,高斯脉冲为:

$$g(t) = A \exp[-4\pi(t/\Delta T)^2] \tag{1}$$

$\Delta T$ :高斯脉冲的有效宽度。脉冲幅度调制的混沌序列为:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n g(t - n\Delta T) \tag{2}$$

$c_n$ :混沌序列,并用于调制高斯脉冲,式(2)可以重写如下:

$$s(t) = g(t) \sum_{n=0}^{N-1} c_n \delta(t - n\Delta T) \tag{3}$$

\* 收稿日期:2006-09-18

作者简介:刘培国(1969—),男,教授,博士。

式(3)为雷达的发射信号,信号频谱如图2所示。其中,功率谱密度3dB宽度为1.6GHz。雷达采用阵列接收,接收机系统框图如图3所示。

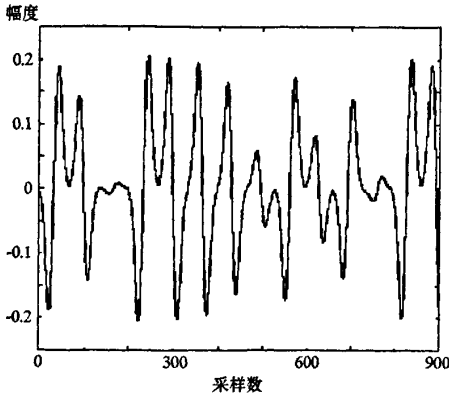


图1 混沌序列波形

Fig.1 Chaos signal waveform in a CPAMUWB radar

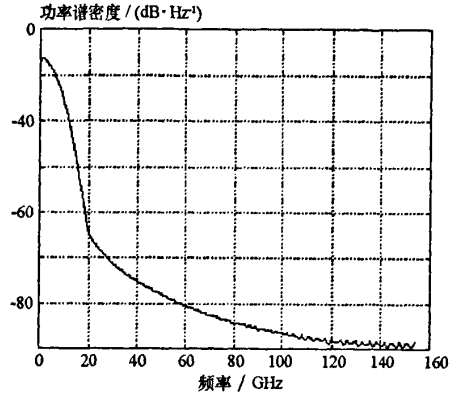


图2 信号频谱

Fig.2 PSD plot of the CPAMUWB signal

### 2 分辨率分析

根据文献[7], $s(t)$ 用于雷达时的距离模糊函数为:

$$R_{\infty}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)s(t+\tau)dt \quad (4)$$

将式(2)代入式(4),得到:

$$R_{\infty}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{n=0}^{N-1} c_n g(t-n\Delta T) \sum_{m=0}^{N-1} c_m g(t+\tau-m\Delta T) dt \quad (5)$$

$$R_{\infty}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} c_n c_m \int_{-\infty}^{+\infty} g(t-n\Delta T)g(t+\tau-m\Delta T)dt \quad (6)$$

进一步推导得:

$$R_{\infty}(\tau) = A^2 \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} c_n c_m \exp\{-2\pi[(\tau/\Delta T) + (n-m)]^2\} \quad (7)$$

可见距离模糊函数为指数函数。因此从理论上讲,采用基本波形为高斯脉冲的混沌序列信号的雷达,不模糊距离为无限大,雷达的实际最大探测距离由接收机的灵敏度决定。

### 3 距离压缩与成像处理

把接收到的信号与发射信号作卷积,可以实现距离压缩。发射信号的自相关特性将影响雷达的距离压缩效果,并最终决定雷达的成像。由于混沌信号具有良好的自相关特性,相关函数的主瓣窄、旁瓣低,故具有良好的距离压缩性能。如图4所示为时间调制超宽带(TMUWB)信号与混沌幅度调制超宽带信号的对比,两种信号的基本波形同为高斯脉冲,且具有相同的位数和长度。可见 TMUWB 信号的距离压缩图存在多

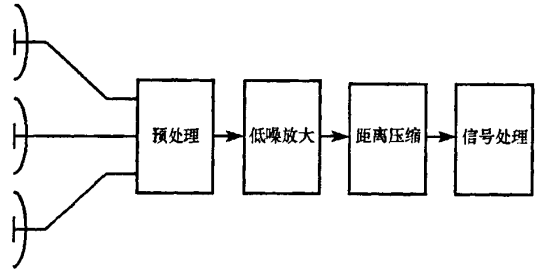


图3 雷达接收机

Fig.3 CPAMUWB receiver-block diagram

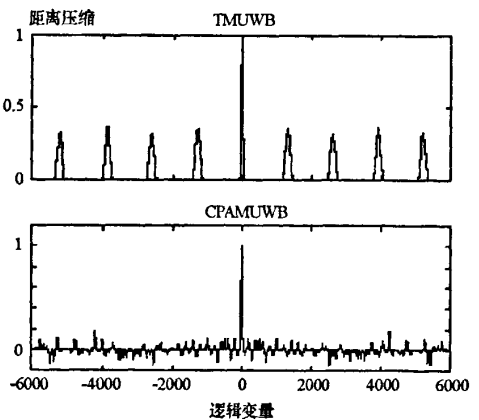


图4 距离压缩图

Fig.4 Range compression plot

个副瓣,且幅度相对较大,达到 -10dB,成像后必然会产生虚假目标。而 CPAMUWB 信号的距离压缩图的副瓣只有 -22dB,可以避免产生虚假目标。

天线接收到的信号包括前时和后时两部分:前时信号是天线间的耦合以及墙壁的反射,后时信号为房间内目标的反射。前时信号可以通过时间窗完全消除,不过必须小心不要将紧靠在墙背后的目标反射信号错误地删除。

下面对接收信号进行成像处理。本文的计算为二维空间,SAR 工作方式,等效天线阵列为  $M$  元,因此计算空间内每一点的散射将产生  $M$  个接收信号。聚焦成像的算法为:

$$I(r) = \left[ \sum_{m=1}^M B_m(\tau_m(r)) \right]^2 \tag{8}$$

$B_m$ :预处理后的位于  $r_m$  处的第  $m$  个阵列单元接收到的散射信号<sup>[7]</sup>;  $\tau_m(r)$ :第  $m$  个阵列单元与空间  $r$  点的双程离散时间延迟。

$$\tau_m(r) = 2|r - r_m|/vT \tag{9}$$

$T$  为采样时间周期, $v$  为电磁波的传播速度。

### 4 仿真结果

本文利用 FDTD 方法进行数值计算,主要参数是:被探测目标为  $10 \times 10(\text{cm}^2)$  的介质体目标,介电常数为 2.0,置于长 2.5m、宽 2m 的房间内,墙体厚度为 10cm,墙体两面为水泥,介电常数为 7.0,另外两面为木质,介电常数为 2.7,如图 5 所示。目标下边沿距离墙 1m,左边沿距离墙 0.75m,SAR 阵列为 40 元等效均匀阵列,阵列长度为 2m,接收机沿木质墙体方向移动。高斯脉冲的有效宽度为 0.6ns,因此距离分辨率约为 9cm。

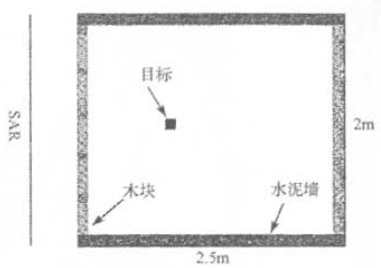


图 5 仿真目标和区域

Fig.5 Simulation setup target away from the front wall

图 6 的左图为 TMUWB 雷达的成像结果,可以清楚地看到目标,同时也存在多个虚假目标,这主要是由于 TMUWB 的相关特性差引起的;右图为 TMUWB 雷达成像的目标探测结果,适当的判决门限可以消除部分虚假目标。

图 7 的左图为 CPAMUWB 雷达的成像结果,不但可以清楚地看到目标,而且不存在虚假目标,右图的目标探测结果也非常明显,可以推测目标的形状。

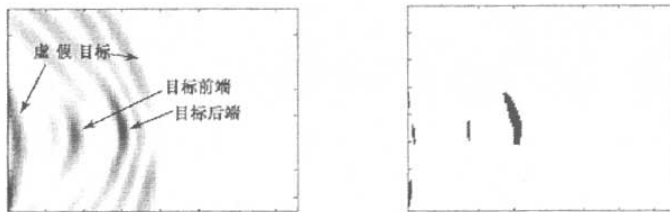


图 6 TMUWB 雷达成像和目标探测

Fig.6 Image formed and detected image formed using TM-UWB radar

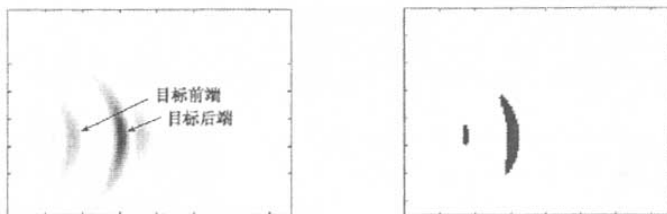


图 7 CPAMUWB 雷达成像和目标探测

Fig.7 Image formed and detected image formed using CPAMUWB radar

当目标距离墙体更近时,可以进一步显示混沌信号的优越性。例如,当目标下边沿距离墙 0.6m、左边沿距离墙 0.35m 时,仿真结果如图 8、图 9 所示,为了清楚地判断目标,图 8、图 9 只显示了部分区域。通过比较可以发现,虽然两图都可以显示目标的存在,但是图 9 可以提供目标大小和轮廓的信息,而图 8 不能达到一点,因为 TM 信号的距离压缩存在较强的副瓣,从而产生较大的干扰,混淆了目标信息。

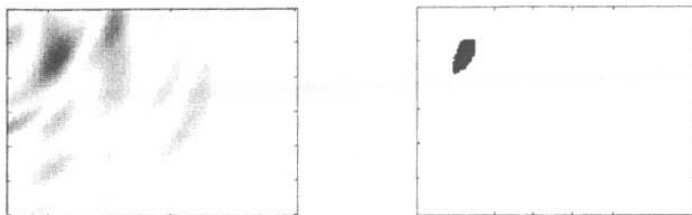


图 8 TMUWB 雷达成像和目标探测

Fig. 8 Image formed and Detected image formed using TM-UWB radar

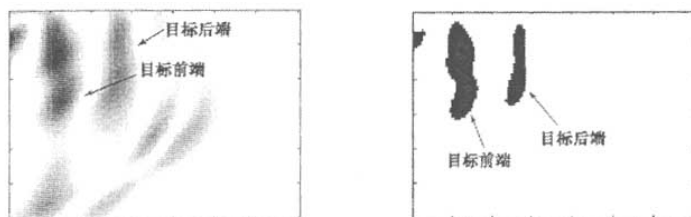


图 9 CPAMUWB 雷达成像和目标探测

Fig. 9 Image formed and Detected image formed using CPAMUWB radar

## 5 结论

分析了 CPAMUWB 信号在穿墙探测雷达中的应用,结果显示,相对于 TM 信号,CPAMUWB 信号具有低的距离压缩副瓣,具有良好的距离分辨率,虚假目标少,容易分辨相互靠近的目标,因此 CPAMUWB 用于消防救援和反恐穿墙探测时,可以清楚地判断被救护人员的位置与姿态、分辨人质与恐怖分子。

## 参考文献:

- [1] Withington P, Fluhrer H, Nag S. Enhancing Homeland Security with Advanced UWB Sensors [J]. IEEE Microwave Magazine, 2003, 4(3): 51-58.
- [2] Nag S, Fluhrer H, Barnes M. Preliminary Interferometric Images of Moving Targets Obtained Using a Time Modulated Ultra Wide Band Through-wall Penetrati on Radar [C]//Proceedings of IEEE Radar Conference, 2001:64-69.
- [3] 周智敏. 机载叶簇穿透超宽带 SAR 关键指标设计[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(5): 63-69.
- [4] Brunzell G. Clutter Reduction and Object Detection in Surface Penetrating Radar[C]//Proceedings of IEEE Radar Conference, 1997:688-691.
- [5] Immoreev I, Fedotov D. Ultra-wideband Radar Systems: Advantages and Disadvantages [C]//IEEE Conference on Ultra-wideband Systems and Technology, 2002:201-205.
- [6] Lohmeier S, Rajaraman R, Ramasami V. Development of an Ultra-wideband Radar System for Vehicle Detection at Railway Crossings [C]//IEEE conference on Ultra Wideband Systems and Technology, May 2002:207-211.
- [7] Juhel B, Legros E, Le Goff M. Algorithms and Experimental Results in Ultra-wideband SAR Imaging [C]//Radar 97 (Conf. Publ. No. 449), 1997:673-677.
- [8] Dawood M, Narayanan R M. Ambiguity Function of an Ultrawideband Random Noise Radar [C]//2000 Antennas and Propagation Society International Symposium, 2000, 4:2142-2145.



