

基于 FPGA 的相控超声发射系统设计与实现

张 慧^{1,2}, 王红亮^{1,2}, 何常德^{1,2}, 张文栋^{1,2}, 薛晨阳^{1,2}

(1. 中北大学 电子测试国家重点实验室, 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 设计了一种以 FPGA 为核心的相控超声发射系统, 对该系统工作原理及相控聚焦方法进行了研究; 设计了一种二维相控阵列, 并进行了阵列定点聚焦延时仿真; 最后运用该系统实现了对相控阵列的高精度聚焦延时控制, 并经过 DA 转换、电压及功率放大, 产生了幅值及波形可控的激励信号, 测试了该系统对实际目标的定位精度; 实验结果显示对实际目标定位偏差在 3% 左右, 该超声相控发射系统可实现相控聚焦发射, 延时控制精度高, 可靠性好。

关键词: 相控超声发射; 相控阵列; 聚焦延时; 定位测试

Design and Implementation of FPGA-based Ultrasound Phased Transmission System

Zhang Hui^{1,2}, Wang Hongliang^{1,2}, He Changde^{1,2}, Zhang Wendong^{1,2}, Xue Chenyang^{1,2*}

(1. National Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051,

China; 2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of

Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: An ultrasound phased transmission system is designed based on FPGA in this paper. The operating principle of phased array focusing transmission is studied. A 2D phased array is designed and the focus time line of the array is simulated. Finally the focusing time line of the phased array is accomplished using the transmission system with high accuracy. Through AD conversion and amplification of voltage and power, an excitation signal is generated, of which the amplitude and wave shape are variable. Then the location of actual targets is measured using the phased array and the transmission system. Result shows a good accuracy with small location deviation of about 3%. This phased ultrasound transmission system can realize phased focusing transmission with high reliability and accuracy of time-delay control.

Keywords: ultrasound phased transmission; 2D phased array; focusing time line; location measurement

0 引言

超声相控阵成像技术最早应用于工业无损检测, 因其检测灵敏度和分辨率高、检测范围大, 具有动态聚焦、可控性强等特点^[1], 现在已广泛应用于军工业无损探伤、医疗诊断设备和混沌水下探测等领域。以相控技术为基础, 现已发展出许多先进的超声成像技术, 如动态聚焦技术、混频相控阵、子阵合成相控阵技术等^[2], 极大地推动了超声相控成像领域的发展。

超声相控阵成像系统由 3 个基本部分构成: 作为敏感元件的相控换能器阵列、作为主要工作单元的超声相控发射与接收硬件系统和进行后期回波信号处理的上位机图像生成及显示软件系统。本文主要针对相控发射系统的设计进行研究。设计了以 FPGA 为核心的超声相控发射系统, 并针对一种二维相控阵列进行了高精度聚焦延时控制, 实际测试了所设计的相控发射板对目标距离定位的准确性, 对超声相控阵发射进行了深入的理论与实践探索。

1 超声相控阵聚焦发射原理与延时分析

超声相控阵的换能器阵列是由一定数目的单独阵元经过一定方式的排布构成的, 常用的阵列有一维线阵和二维面阵两种基本形式, 一维有线阵、扇形阵、环阵等形式; 二维有矩形面阵、圆环面阵、凸面阵等。相控阵列中的每个阵元都能够被单独激发产生超声波, 单个阵元发出的声波是球面波。按照不同的信号延时方案激励各个阵元, 可以使得所有阵元的声波进行空间叠加, 形成不同方向和不同传播效果的合成波阵面, 从而达到控制波束指向的目的。基本的相控发射方式为相控偏转发射和相控聚焦发射, 如图 1 所示。将相控偏转和聚焦综合运用即可实现空间中任一确定点的波束聚焦^[3]。

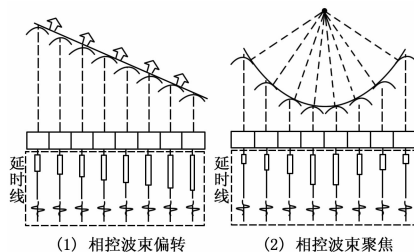


图 1 相控偏转和聚焦原理示意图

收稿日期: 2014-04-01; 修回日期: 2014-05-20。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61127008); 国家 863 计划(2011AA040404)。

作者简介: 张 慧(1989-), 女, 河北唐山人, 硕士生, 主要从事 MEMS 超声换能器阵列设计与成像系统方向的研究。

相控阵各个阵元的空间波束聚焦延时量可以通过几何关系得到。如图 2 所示, 以一维 N 元均匀线阵为例, 将左起第一个

阵元设为参考阵元, 首先考虑当聚焦点位置确定的情况下, 阵列中各阵元延时量的计算方法。将阵列聚焦点坐标设为 $(x, 0, h)$, 若阵元中心距为 d , 声速为 c , 对于阵列中的任一阵元 m , 设其相对于参考阵元的延时量为 τ , 由几何关系可得, 阵元 m 到焦点的距离 L 和参考阵元到焦点的焦距 F 分别为:

$$L = \sqrt{(x - md)^2 + h^2} \quad (1)$$

$$F = \sqrt{x^2 + h^2} \quad (2)$$

又由延时关系可知, 参考阵元与阵元 m 的发射声波同时到达焦点时, 由延时量产生的声程差关系为:

$$\tau c = F - L \quad (3)$$

所以延时量 τ 的计算公式可表示为:

$$\tau = \frac{\sqrt{x^2 + h^2} - \sqrt{(x - md)^2 + h^2}}{c} \quad (4)$$

若已知焦点相对于参考阵元的偏转角度 θ 和焦深 h , 则计算阵元 m 延时量的公式可通过余弦定理推导出:

$$\tau = \frac{F + \sqrt{(md)^2 + F^2 - 2F(md)\sin\theta}}{c} \quad (5)$$

其中:

$$F = \frac{h}{\cos\theta} \quad (6)$$

通过以上计算可得到每个阵元的发射延时量, 同时可确定聚焦点位置坐标为 $(h \tan\theta, 0, h)$ 。

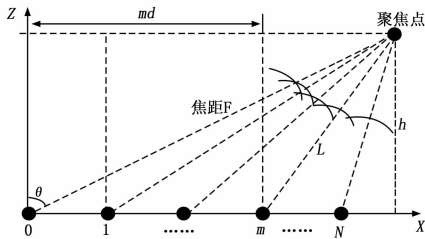


图 2 阵列相控聚焦几何关系图

当阵元数较少时 ($N < 8$), 线性阵列的相控成像效果较差。对于一个 N 元线阵来说, 由 Huygens 原理^[4]可知, 声场中任一点的总声压为阵列中各个阵元在该点声压强度的叠加。因此二维相控面阵将大大提高成像分辨率, 但也明显增加设计难度和信息处理量。为了兼顾聚焦效果和系统复杂性, 本文设计了 3 行 6 列的换能器阵列, 阵元直径为 1 cm, 材料为压电陶瓷, 中心频率 200 kHz。图 3 (a) 为阵列阵列相控聚焦几何关系示意图。设第 2 排换能器在 $y=0$ 轴线上, 则第 1 排和第 3 排分别位于 $y=d, y=-d$ 线上。若聚焦点在正前方 z 轴, 相比中间一排, 上下两排每个换能器阵元声波到达焦点的时间都多出了 Δt , 且:

$$\Delta t_n = (\sqrt{d^2 + l_n^2} - l_n) / c \quad (7)$$

其中: l_n 为阵元 n 到焦点的距离, d 为阵元间距, c 为声速。图 3 (b) 为焦点位置为 $(0, 0, 20)$ 时, 第 1、3 排和第 2 排阵元的延时线仿真图。可以看出第 2 排每个阵元发射都延迟第 1、3 排一个 Δt 的时间。表 1 所示为各阵元发射延时量及各 Δt 值, 其中负值代表相对于参考阵元在发射时间上的延后性。由于本文设计的成像系统基本时钟用的是 100 MHz 晶振, 延时时间精度可达 10 ns, 因此可以准确实现该 Δt 在硬件上的控制。

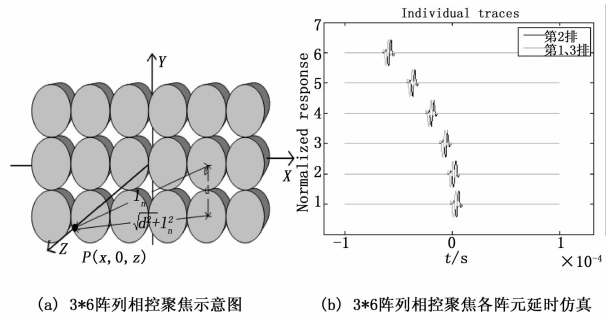


图 3 3 * 6 形式二维阵列相控聚焦原理

表 1 3 * 6 阵列各阵元延时量及 Δt (μs)

| | 阵元 0 | 阵元 1 | 阵元 2 | 阵元 3 | 阵元 4 | 阵元 5 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,3 排 | -2.65 | -5.29 | -13.1 | -26.0 | -43.5 | -65.4 |
| 2 排 | 0 | -2.65 | -10.5 | -23.4 | -41.0 | -63.0 |
| Δt | 2.65 | 2.64 | 2.60 | 2.55 | 2.48 | 2.39 |

2 超声相控发射系统工作原理

超声相控阵发射系统的关键技术是实现对各阵元精确延时控制和激励信号的产生。图 4 显示了本文设计的超声相控发射系统结构。该系统以 FPGA 作为主控平台, 由上位机经 PCI 接口连接相控发射板, 板上 FPGA 控制模块内设有延时计算模块、参数寄存器、计数器、比较器和波形存储器组成。对于该 3 * 6 阵列中轴线上的相控聚焦来说, 第 1、3 行各阵元延时是相同的, 因此共有 12 个延时参量。发射时, 由上位机下发聚焦位置参数, 送入延时计算模块计算各个通道阵元的延时量, 保存在延时参数寄存器中。在同步信号作用下, 各路计数器立即开始计数, 并与寄存器中的延时量进行比较。当计数与延时量相等时产生溢出, 作为控制信号去控制波形存储器输出存储的数字激励波形。各阵元经过不同延时的发射控制, 即可实现相控聚焦发射。相比传统的模拟延时线控制相位的聚焦方式, 本系统提出的数字延时精度更高, 可控性更好。此外, 本文参考了文献[5]中的波形发射方式设计, 在本系统中增加了波形存储器单元, 将所需激励信号波形预先编辑好并存储在波形存储器中, 相比传统的单一单脉冲激励形式, 这种方法产生的激励信号形式更灵活, 可控性更强。

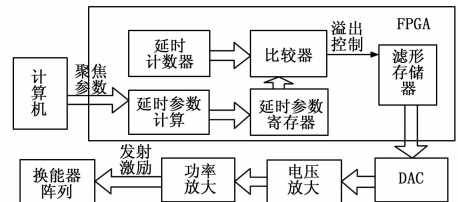
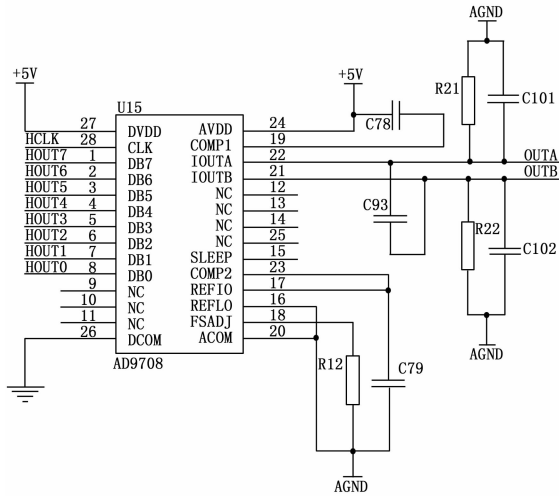


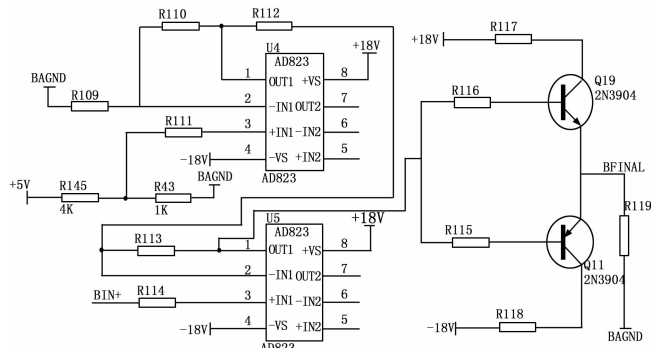
图 4 相控发射系统结构原理框图

由波形存储器产生的数字波形经过 D/A 转换, 形成模拟激励信号如图 5 所示。DA 转换芯片选用 ANALOG 公司的 AD9708, 它是 14 位并行高速数模转换芯片, 转换速率高达 125 MHz, 对于中心频率为 200 kHz 的换能器, 是绝对满足转换速率要求的。经过 DA 转换后的模拟信号幅值范围约为 0 ~ 2 V, 无法激励换能器产生满足需求功率的超声波, 因此需要进行电

压放大及功率驱动。此处选用两级高频低噪运放 AD823，构成偏置放大电路，首先将信号偏置到±1 V，再进行幅值放大。为了进一步增大系统的驱动能力，最后再进行功率放大，即产生最终激励信号，并成功驱动换能器产生了满足测试需求的超声信号。激励及超声回波信号波形如图 6 所示。其中脉冲波是峰峰值为 23.7 V 的激励信号，脉宽 2.5 μs，单次激发的脉冲数为 4 个；换能器接收到的回波信号波形为连续逐渐衰减的波包，分析原因是换能器之间声波的来回反射造成的干扰，随着距离越远能量随衰减降低，波包峰值包络变小。



(a) DA 转换电路原理



(b) 电压及功率放大电路原理

图 5 相控发射 DA 转换及放大模块电路原理图

阵元发射延时量，在 Quartus II 的环境下运用 VHDL 语言编写了聚焦发射的延时程序并下载到系统发射板 FPGA 中^[7]，产生了幅值及波形可控的激励信号。图 7 为延时控制时序结果图。换能器的工频为 200 kHz，激励脉宽为换能器中心频率对应周期时间的一半时，可得到最大的激励效率^[6]，因此脉宽设定为 2.5 μs。图 8 为发射系统产生的 4 路聚焦激励波形。由图可见，各路信号延时控制良好，脉宽稳定，实现了高精度延时聚焦控制。

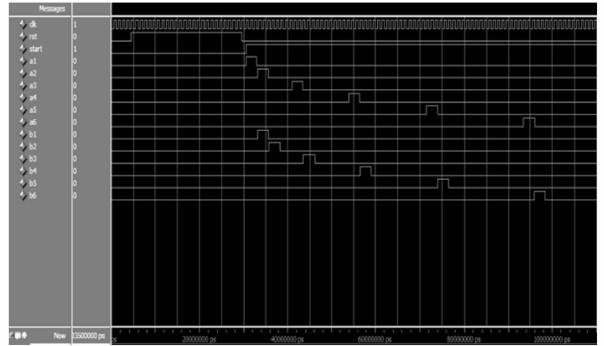


图 7 聚焦发射延时时序图

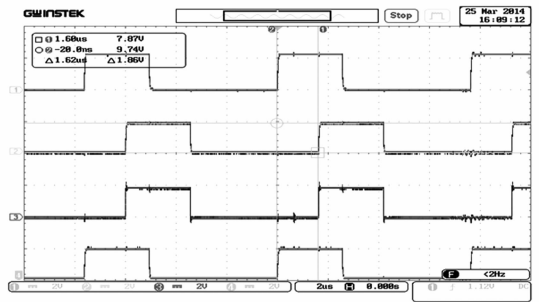


图 8 聚焦发射激励波形图

另外，应用本文设计的相控发射系统对实际目标进行距离定位测试。由表 2 的测试结果数据来看，测量值与实际值的偏差在 3% 左右，是比较小的。分析造成这种偏差的主要原因是，换能器受到脉冲激励之后有超声发射延迟，且由于压电超声换能器的惯性阻尼振动造成回波信号波形复杂，难以准确检测出回波时间起始点，造成测量误差。

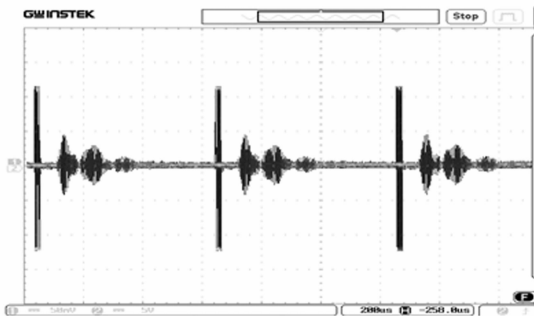


图 6 激励信号和回波信号波形

表 2 相控扫描目标位置结果及偏差 (mm)

| | 目标 1 | 目标 2 | 目标 3 | 目标 4 | 目标 5 |
|------|------|------|------|-------|-------|
| 实际位置 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
| 检测位置 | 41.2 | 62.3 | 81.9 | 103.7 | 124.5 |
| 位置偏差 | 3% | 3.8% | 2.4% | 3.7% | 3.8% |

4 结论

本文以 FPGA 为核心，设计了一种超声相控阵发射系统，并详细阐述了该系统相控聚焦发射的工作原理。针对二维相控阵列实现了具体的高精度聚焦延时控制；应用该发射系统激励换能器进行了目标距离超声定位测试，数据结果测量值与实际值偏差较小。该超声相控阵成像系统延时控制精度高，可靠性好，具有一定的科研及应用价值。

3 相控发射实验与结果

根据表 1 中 3 × 6 换能器阵列聚焦于点 (0, 0, 20) 时各

药成品。RFID 标签用户区用来存储静态信息和动态信息, 由生产 (20 位)、管理 (30 位) 等字段组成。例如: 当某箱成品下线时, 可写入用户区生产字段“U720130823; 102223”, 表示该箱成品由广东天诺民爆有限公司梅县分公司于 2013 年 8 月 23 日 10 时 22 分 23 秒下线。如果由于某种原因, 该箱部分药卷被使用, 那么就要及时更新管理字段信息。

3.1.3 个体标识与批量标识的映射

单根药卷与每箱成品信息映射基本原理, 是将每根药卷编码信息与每箱成品编码信息进行对应, 并添加一些需要管理字段, 然后按照统一规则编码。例如: 每箱成品对应 80 根 $\varnothing 32$ mm 药卷, 药卷批号 20130823, 序列号 000001~000080, 因此, 可以在 RFID 标签用户区管理字段添加如下信息: 003220130823000001~000080。同时, 上述信息传输到 RFID 数据采集系统数据库, 并在数据库中建立两者相关联的二维表。

3.2 标识信息获取

3.2.1 条形码信息的获取

个体标识粘贴有两种方式: 一种是直接在单根药卷外包装印刷条形码; 另一种是预先打印条形码, 然后在线贴。实际应用表明, 现有技术无法满足前者需求。因此, 本文采用传统条形码技术, 通过红外线扫描来识别。在中包工序之前位置, 利用贴码机, 把预先打印好条形码逐个贴在药卷上, 同时读取条形码信息并传输到 RFID 中间件, 与所采集 RFID 标签在数据库中建立 RFID-条形码关联。

3.2.2 RFID 标签信息获取

工业炸药产品信息分为静态信息和动态信息两类。本文静态信息是指 EPC 码、产品信息 (生产厂家、生产日期) 等, 动态信息反映了工业炸药全流程实时流向, 如图 5 所示。

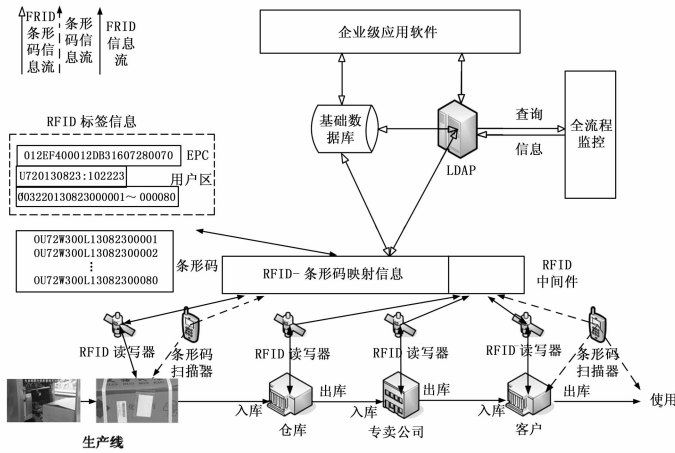


图 5 RFID 标签信息获取

RFID 读写器分别布置在各个监控点, 生产线在线贴标 (RFID 标签和条形码); 读写器读取 RFID 标签 EPC 编码后, 并在用户区写入产品静态信息“U720130823; 102223”, 以及 RFID 与条形码关联信息“003220130823000001~000080”。此外, LDAP 服务器地址 (www.xLDAP.com) 也是需要写在用户区。上述采集信息传输到 RFID 中间件, 由中间件分别传递到基础数据库和 LDAP 服务器。基础数据库保存条形码、RFID 以及两者之间的映射关系, 并存储产品下线信息 (生产时间、批号、数量等), 在 LDAP 服务器生成关于该 RFID 标签条目。当该成品在运输、专卖公司、用户等流通时, 各点布置 RFID 读写器读取运输、出入库动态信息, 并上传到基础数据库; 通常在使用该产品爆破作业时, 才需要利用条形码扫描器采集个体标识信息; 同时要修改相关联 RFID 条目 (主要是属性 RFID-Barcode 值)。由于 LDAP 服务器和客户端开放性, 可以在任意时间任意地点查询条目, 获取 RFID 标签静态信息, 同时查询相关联基础数据库信息, 而获取相应动态信息。

4 结论

工业炸药是高危化学品, 其在全生命周期的流向将对公共安全造成潜在危害。本文针对工业炸药全生命周期产品流向特点, 提出基于 RFID 和条形码混合模式的产品信息标识和识别模式。该模式既充分利用 RFID 技术特点特性, 又兼顾条形码成本低优势。实际应用表明, 本文提出的 RFID 和条形码混合模式工业炸药产品标识和信息获取技术, 可以较好地解决目前工业炸药全生命周期内动态流向信息监控不足问题。

参考文献:

[1] 杨祖一, 闫正斌, 亓希国. 爆破器材流向信息标识和识读方式研究 [J]. 爆破器材, 2004, 12: 109-114.
 [2] Koutsonikola V, Vakali A. LDAP: framework, practices, and trends [J]. IEEE Internet Computing, 2004, 8 (5): 66-72.
 [3] 郑方伟, 周明天, 余 莹. RFID 信息获取机制的分析与比较技术 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27 (1): 6-13.
 [4] EPC global architecture framework [EB/OL]. http://www.epc-globalinc.org/standards/architecture/Architecture_1_2_framework-20070910.pdf.
 [5] EPCglobal tag data standards version 1.4 [EB/OL]. (2008-06-11). http://www.epcglobalinc.org/standards/tds/tds-1-4-standard-20080611.pdf.
 [6] 许 亮, 黄志平, 肖开文, 等. 基于 RFID 工业炸药生产过程实时监控系统的开发与实现 [J]. 微计算机与信息, 2012, 28 (9): 46-48.

(上接第 2640 页)

参考文献:

[1] 王 伟. 超声相控阵可控强度发射系统相关技术的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2010: 1-3.
 [2] Yun D, Kim J, Jhang K Y. Imaging of contact acoustic nonlinearity using synthetic aperture technique [J]. Ultrasonics, 2013, (53): 1349-1350.
 [3] 齐 雁, 谭冠政, 范必双. 基于 FPGA 的医学超声成像数字波束合成器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (4): 896-899.

[4] 王浩全. 超声成像检测方法的研究与实现 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 17-19.
 [5] 鲍晓宇, 施克仁, 陈以方, 等. 超声相控阵系统中高精度相控发射的实现 [J]. 清华大学清华大学学报, 2004, 44 (2): 153-156.
 [6] 杨 剑, 高成强, 刘晓方. 超声激励方式对检测信号的影响 [J]. 无损检测, 2010, 32 (1): 37.
 [7] 王 鹏, 吕志刚, 杜卫东. 基于 FPGA 与 ARM 的多路时序控制系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (6): 1540-1543.