

# 内存测试方法的研究和实现

赵雪莲 杜宇

(北京自动测试技术研究所 北京 100088)

**摘要:**本文主要讲述内存芯片的测试方法,并在国产集成电路测试系统上完成测试。通过硬件算法图形产生器模块弥补自动测试系统数字通道图形深度不足的问题,该模块具有24位独立地址输出,具有地址装载、保持、加一和减一等功能。采用新March算法,增加多种故障模型,优化编写图形向量,减少其图形深度,提高其故障覆盖率。不仅能加快内存芯片测试的速率,还能保证功能测试的故障覆盖率,对我国内存芯片的测试产生积极的影响。

**关键词:**算法图形产生器;测试向量;自动测试系统;March算法

**中图分类号:** TP9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3010

## Research and implementation of Memory test methods

Zhao Xuelian Du Yu

(Beijing institute of automatic test technology, Beijing 100088, China)

**Abstract:** This paper focuses on the memory chip testing methods, and in the domestic IC test system to complete the test. Graph algorithms generated by the hardware modules make up the digital channel graphics depth automatic test system the problem of insufficient, the module has 24 independent address output, with address loading, hold, plus one and minus one feature. Adoption of the new march algorithm, increase the variety of fault models, optimization prepared graphics vector, reduce its graphical depth, improve its fault coverage. Not only can accelerate the rate of the memory chip testing, but also to ensure functional test fault coverage, testing of memory chips to China have a positive impact.

**Keywords:** algorithm pattern generator; test vector; ATE; march algorithm

### 1 引言

随着半导体集成电路的高速发展,其生产、设计、测试、封装等技术大幅提升,给我们的生产生活带来了极大的便利。内存芯片作为计算机、通讯和消费类电子产品等领域必不可少的组成部分,扮演着重要角色。内存芯片是集成电路中很重要的门类,它主要用于存储数据、指令、程序等信息,并能根据需要,存储或取出信息的集成电路。

本文探究的是内存芯片在自动测试设备(ATE)上的测试方法,其测试项目包括功能测试、直流参数测试和交流参数测试,重点讲述功能参数测试。功能测试是检测内存芯片是否具备写入、读出和保持信息的功能,通过改变寻址顺序和数据图案,检测所有存储单元能否正确读写和保持信息。

当前制约内存芯片测试的瓶颈主要是 ATE 图形深度和高故障覆盖率的图形向量。根据测试各种故障模型的需求,测试一个内存,通常需要根据具体的故障模型按一

定顺序对每一个地址反复的读写操作几十次,并得出测试结果。于是对于一个只有 1M 容量的器件,需要的图形深度至少是几个 G,甚至是几十个 G,是目前绝大多数 ATE 的图形深度无法达到的。故本文提出使用硬件算法图形产生器模块弥补图形深度不足的问题,并采用新算法提高图形向量的故障覆盖率。

### 2 测试项目

芯片的测试贯穿其研发、生产和应用的整个过程,是全面检测其技术指标的必要手段,其重要性不言而喻。芯片的测试方法既要能覆盖其所有的技术参数,还要具备效率和经济性。内存芯片的测试项目包括功能测试、直流参数测试和交流参数测试。

#### 2.1 功能测试

功能测试是检测内存芯片是否具备写入、读出和保持信息的功能,通过改变寻址顺序和数据图案,检测所有存储单元能否正确写入、读出和保持信息,还要检测地址译

收稿日期:2013-06

码器和控制端等信号能否正常工作。具体方法首先由 ATE 提供各种信号,将数据写入到相应地址,再施加读出信号将数据从各地址输出,与之前写入的数据作比较,由此判断功能是否合格。

## 2.2 直流参数测试

直流参数测试可具体测试出内存芯片技术参数的电压电流值,包括输入漏电流、输出电压、输出漏电流、电源电流等参数。根据器件资料,由 ATE 施加各种规定的条件,测试出器件的具体参数,再和器件资料里规定的指标范围作比较,由此判断直流参数是否合格。

## 2.3 交流参数测试

交流参数测试对于数字器件来说,即时间参数测试,反映的是内存芯片执行各种功能的时间,包括上升下降时间、传输延迟时间、工作频率等参数。根据被测时间参数的特性,编写图形向量,由 ATE 设定图形向量内信号的时间,执行图形向量,不断改变与被测时间参数有关的时间点,找到图形向量执行结果由失效到合格的时间点(合格到失效也行),再根据被测时间参数所需的时间点做计算,即为被测交流参数。

# 3 功能测试方法详述

内存芯片的完整测试包含功能测试和交直流参数测试,此次测试是基于 ATE 来实现的,只要能开发出功能测试的图形向量,交直流参数的测试可通过 ATE 相对简单地实现,故下面只讲述内存芯片测试的难点,如何开发功能测试的图形向量。

## 3.1 算法图形产生器

开篇提到过内存芯片的功能测试需要大量的不同故障模型的图形向量,造成了图形向量巨大,达到几十个 G,是目前绝大多数 ATE 数字通道的图形深度无法达到。其实可以换一种思路:在不需要太大图形深度的情况下,完成对每一个地址反复几次、几十、甚至上百次的操作,那么棘手的问题就能迎刃而解。

算法图形产生器(简称 APG)就是解决问题的最好利器:将对每一个地址的重复性读写工作,替换为一个循环操作,结合 ATE 的硬件模块完成对地址的产生和处理,可对地址进行程控自动装载、保持、加一或减一等操作,其他如控制端和数据端信号由 ATE 普通数字通道提供。实现这个循环操作所需要的图形向量很少,对系统资源的要求并不高,但是可以满足内存芯片图形向量增大的需求。如图 1 所示。

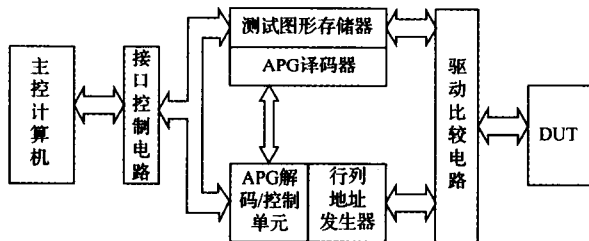


图 1 具备 APG 的 ATE 结构

## 3.2 新算法

测试方法的正确选择,即选用各种图形方式,以较少的图形(即花费较少的测试时间)达到较高的故障覆盖率。内存芯片的工作原理和测试原理要比较复杂,没有一种测试图形向量能够达到 100% 的故障覆盖率。所以在实际测试的时候,为了达到高的故障覆盖率(接近 100%),不能只依靠其中的某一种测试图形向量,而是要有针对性地结合两种、三种或者更多的测试图形向量,即采用某种测试算法。常用的测试算法主要有 March、Walk、Gallop 算法等。

March 算法又包括多种算法图形,如 March C-、March G、March LR 图形等。

March C- 图形是一个 10N 图形,它虽然看起来很简单,却能够检测出大量的工艺缺陷故障,包括固定故障(stuck-at fault),多种耦合故障(如 unlinked idempotent coupling fault),以及多种解码故障(decode fault)等。因此在此 IC 制造业中被广泛采用。

1	W0 ↑
2	R0, W1 ↑
3	R1, W0 ↑
4	R0, W1 ↓
5	R1, W0 ↓
6	R0 ↑

图 2 March C- 图形

March G 图形包括了两个延时(delay)操作,可以对资料的保持时间进行测试。除此之外,March G 图形对于检测常开故障也非常有效。该图形是一个 23n 图形。

1	W0 ↑
2	R0, W1, R1, W0, R0, W1 ↑
3	R1, W0, W1 ↑
4	R1, W0, W1, W0 ↓
5	R0, W1, W0 ↓
6	Delay
7	R0, W1, R1 ↑
8	Delay
9	R1, W0, R0 ↑

图 3 March G 图形

March LR 图形严格来说不是完全的 March 图形,它既包括了 walking 操作,也包括了 marching 操作。该图形也是工业中内存测试常用的算法图形之一,主要用来检测实际连接故障(realistic linked faults)。这是一个 14N 图形。

1	W0 ↑
2	R0, W1 ↓
3	R1, W0, R0, W1 ↑
4	R1, W0 ↑
5	R0, W1, R1, W0 ↑
6	R0 ↑

图4 March LR 图形

March C、March G、March LR 这三种测试算法各有优势。测试算法的确定会以他们为参考,以最少的图形覆盖至少固定故障(SAF)、转换故障(TF)、耦合故障(CF)、相邻图形敏感故障(NPSF)等四种故障。

#### 4 实际测试

##### 4.1 准备工作

本次实际测试选取的平台是我所自主研发的大规模数模混合集成电路测试系统,该系统具有测试速率高、数字通道管脚数多等特点,结合硬件算法图形产生器,可基本满足内存芯片的测试需求。

本次基于国产测试系统开发的算法图形产生器具有独立的2个12位X算法地址计数器和2个12位Y算法地址计数器,具有地址复用的功能,如图5所示。

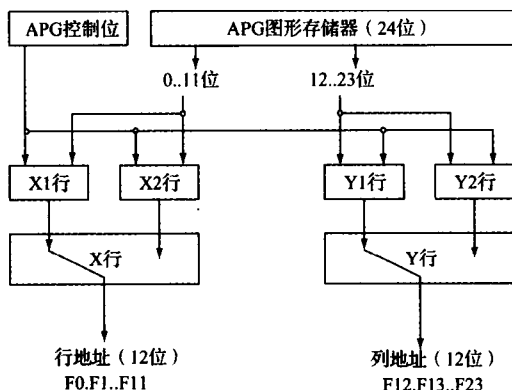


图5 算法图形产生器

控制该算法图形产生器的命令如下:

L:LOAD 从数据图形存储器装载地址值

+;INC 地址值加1

-;DEC 地址值减1

H:HOLD 地址值保持不变(与上一周期的地址值一致)

INC:顺次执行一行图形

INC LL1 000 LL1 FFF (1011111111)

表示:对X1行地址装载(L)0(000),对Y1列地址装载(L)1(FFF);

INC HH1 000 HH1 FFF (1011111111)

表示:X1行地址保持不变(H),Y1列地址保持不变(H),与000和FFF无关;

INC +H1 000 +H1 FFF (1011111111)

表示:X1行地址加1(+),Y1列地址加1(+),与000和FFF无关;

INC -H1 000 -H1 FFF (1011111111)

表示:X1行地址减1(-),Y1列地址减1(-),与000和FFF无关;

除了地址管脚,被测内存芯片的输入数据及控制信号(读、写、片选等)由普通数字通道(管脚电路)提供。

##### 4.2 样片实测

选取 Hynix 公司的 HY57V121620LT-P 作为样片进行实际测试,它广泛应用于计算机、通讯等多个领域。此芯片为 SDRAM(同步动态随机存储器),其存储容量为 512 Mbit,所有输入和输出与时钟的上升沿同步,电平与 LVTTTL 兼容。该样片共有 54 个管脚,包含 CLK、CKE、CS/、BA0、BA1、A0-A12、RAS/、CAS/、WE/、UDQM、LDQM、DQ0-DQ15、VDD/VSS、VDDQ/VSSQ、NC。为了方便编写图形向量,可以将这些管脚分为4类:

1类:地址管脚 A0-A12;

2类:控制信号 CLK、CKE、CS/、BA0、BA1、RAS/、CAS/、WE/、UDQM、LDQM;

3类:数据信号 DQ0-DQ15;

4类:电源信号 VDD/VSS、VDDQ/VSSQ、NC。

地址线 A0-A12 与测试系统的数字通道 DUT0-DUT12 依次连接(测试程序内会设定 DUT0-DUT12 为算法图形产生器专用通道),控制和数据信号管脚与相应的普通数字通道连接,电源由 DPS1 提供。

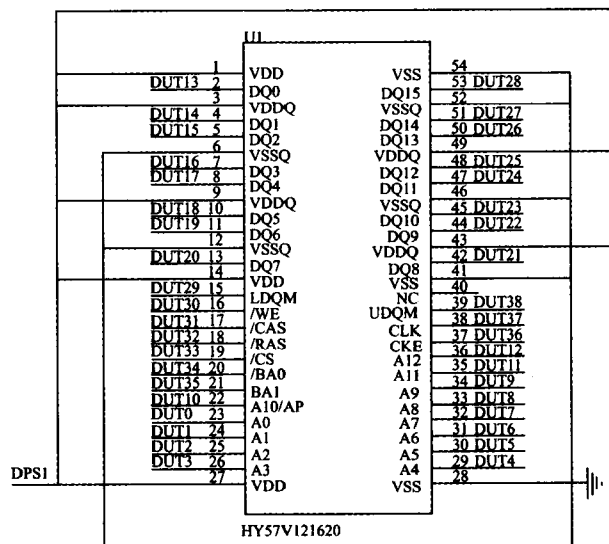


图6 适配器原理

按图6准备好 HY57V121620 的测试适配器后,在测试系统主控计算机上开发测试程序。首先按“管脚名=输入/输出特性,描述方式,通道号”的格式定义管脚如下:

CLK = I, BIN, (37)

CKE = I, BIN, (36)

CS = I, BIN, (33)  
RAS = I, BIN, (32)  
CAS = I, BIN, (31)  
WE = I, BIN, (30)  
LDQM = I, BIN, (29)  
UDQM = I, BIN, (38)  
BA0 = I, BIN, (34)  
BA1 = I, BIN, (35)  
DQ15 = IO, BIN, (28)

.....

DQ0 = IO, BIN, (13)

地址管脚 A0-A12 与 DUT0-DUT12 连接, 直接由算法图形产生器控制并产生各种算法图形, 在管脚定义中不用定义。

然后编写测试向量代码:

.....

```
INC LL1 FFF LL1 000 ( 1100101111
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX )
INC LL1 FFF LL1 000 ( 1101110011
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX )
INC LL1 FFF LL1 000 ( 1100011111
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX )
INC LL1 FFF LL1 000 ( 1101110011
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX )
INC LL1 FFF LL1 000 ( 1100110000
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX )
INC LL1 000 LL1 000 ( 1101110000
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX )
INC LL1 000 LL1 000 ( 1110000000
1000000000000000 )
INC LL1 000 LL1 000 ( 1101000000
0100000000000000 )
INC + L1 000 LL1 000 ( 1101000000
0010000000000000 )
INC + L1 000 LL1 000 ( 1101000000
0001000000000000 )
INC + L1 000 LL1 000 ( 1101000000
0000100000000000 )
INC + L1 000 LL1 000 ( 1101000000
0000010000000000 )
INC LL1 000 LL1 000 ( 1101010000
HLLLLLLLLLLLLLLLL )
INC + L1 000 LL1 000 ( 1101110000
LHLLLLLLLLLLLLLLLL )
INC + L1 000 LL1 000 ( 1101110000
LLHLLLLLLLLLLLLLLLL )
INC + L1 000 LL1 000 ( 1101110000
LLLHLLLLLLLLLLLL )
```

```
INC + L1 000 LL1 000 ( 1101110000
LLLLHLLLLLLLLLLLL )
INC + L1 000 LL1 000 ( 1101110000
LLLLLHLLLLLLLLLLLL )
```

.....

最后 ATE 运行以下测试程序, 执行功能测试:

```
fset_dps1(3.3);conn_dps1();
fset_vih(2.4);fset_vil(0.4);
fset_voh(2.4);fset_vol(0.4);
conn_vih_vil_voh_vol();
ptn_buf=Load_Pattern("HY57V121620.MPD");
Set_DCLK(100);
Set_pin_format(37,FMT_RZ);
Select_pin_tg(37,TG2);
fail=RUN_PATTERN((unsignedchar *)ptn_buf,
0,PRINT_ON_FAIL,0);
```

功能测试的结果将返回至 fail 变量中, 如 fail=0, 表明样片功能测试合格; 如 fail≠0, 表明样片功能测试失效。

交直流参数的测试按照 HY57V121620LT-P 的器件手册来完成, 这里不再讲述。

实际测试数据如下:

```
* * * Operating Current test * * *
ICC = 92.813509 mA
FUNCTION PASS
* * * FORCE I(4.0mA) MEASURE VOL * * *
VOL_Max = 0.400 000 V
VOL (02) = 0.191 917 V
VOL (04) = 0.194 801 V
VOL (05) = 0.186 928 V
VOL (07) = 0.193 893 V
VOL (08) = 0.194 994 V
VOL (10) = 0.190 416 V
VOL (11) = 0.184 475 V
VOL (13) = 0.192 574 V
VOL (42) = 0.188 905 V
VOL (44) = 0.187 404 V
VOL (45) = 0.187 202 V
VOL (47) = 0.191 120 V
VOL (48) = 0.192 225 V
VOL (50) = 0.191 010 V
VOL (51) = 0.188 917 V
VOL (53) = 0.196 570 V
* * * FORCE I(-4.0mA) MEASURE VOH * * *
VOH_MIN = 2.400 000 V
VOH (02) = 2.808 382 V
VOH (04) = 2.804 494 V
VOH (05) = 2.811 880 V
VOH (07) = 2.804 853 V
```

VOH (08) = 2.802 678 V

VOH (10) = 2.803 842 V

VOH (11) = 2.811 892 V

VOH (13) = 2.803 842 V

VOH (42) = 2.815 335 V

VOH (44) = 2.814 860 V

VOH (45) = 2.816 420 V

VOH (47) = 2.813 513 V

VOH (48) = 2.813 848 V

VOH (50) = 2.814 311 V

VOH (51) = 2.818 041 V

VOH (53) = 2.810 509 V

\* \* \* FORCE V(3.6V) MEASURE ILO \* \* \*

ILO\_MAX = 1.000 000 uA

ILO (02) = -0.073 758 uA

ILO (04) = -0.040 596 uA

ILO (05) = -0.051 715 uA

ILO (07) = -0.060 883 uA

ILO (08) = -0.070 052 uA

ILO (10) = -0.072 392 uA

ILO (11) = -0.057 372 uA

ILO (13) = -0.063 029 uA

ILO (42) = -0.044 497 uA

ILO (44) = -0.085 267 uA

ILO (45) = -0.093 850 uA

ILO (47) = -0.060 493 uA

ILO (48) = -0.072 587 uA

ILO (50) = -0.072 783 uA

ILO (51) = -0.066 150 uA

ILO (53) = -0.056 202 uA

\* \* \* FORCE V(0.0V) MEASURE ILO \* \* \*

ILO\_MAX = 1.000 000 uA

ILO (02) = -0.055 827 uA

ILO (04) = -0.066 163 uA

ILO (05) = -0.037 104 uA

ILO (07) = -0.056 412 uA

ILO (08) = -0.057 387 uA

ILO (10) = -0.055 632 uA

ILO (11) = -0.067 919 uA

ILO (13) = -0.054 852 uA

ILO (42) = -0.063 628 uA

ILO (44) = -0.031 838 uA

ILO (45) = -0.062 068 uA

ILO (47) = -0.070 649 uA

ILO (48) = -0.034 568 uA

ILO (50) = -0.067 529 uA

ILO (51) = -0.072 209 uA

ILO (53) = -0.054 852 uA

\* \* \* FORCE V(3.6V) MEASURE ILI \* \* \*

ILI\_MAX = 1.000 000 uA

ILI (15) = -0.026 208 uA

ILI (16) = -0.001 264 uA

ILI (17) = -0.004 183 uA

ILI (18) = -0.006 310 uA

ILI (19) = -0.011 186 uA

ILI (20) = -0.008 705 uA

ILI (21) = -0.009 554 uA

ILI (22) = -0.010 072 uA

ILI (23) = -0.005 190 uA

ILI (24) = -0.004 986 uA

ILI (25) = -0.008 757 uA

ILI (26) = -0.009 573 uA

ILI (29) = -0.005 516 uA

ILI (30) = -0.006 675 uA

ILI (31) = -0.010 452 uA

ILI (32) = -0.004 131 uA

ILI (33) = -0.008 051 uA

ILI (34) = -0.011 788 uA

ILI (35) = -0.013 350 uA

ILI (36) = -0.013 109 uA

ILI (37) = -0.013 627 uA

ILI (38) = -0.009 624 uA

ILI (39) = -0.008 100 uA

\* \* \* FORCE V(0.0V) MEASURE ILI \* \* \*

ILI\_MAX = 1.000000 uA

ILI (15) = -0.014 015 uA

ILI (16) = -0.022 465 uA

ILI (17) = -0.019 977 uA

ILI (18) = -0.018 688 uA

ILI (19) = -0.021 616 uA

ILI (20) = -0.014 582 uA

ILI (21) = -0.021 162 uA

ILI (22) = -0.020 211 uA

ILI (23) = -0.021 082 uA

ILI (24) = -0.017 884 uA

ILI (25) = -0.027 775 uA

ILI (26) = -0.004 545 uA

ILI (29) = -0.018 368 uA

ILI (30) = -0.017 098 uA

ILI (31) = -0.014 165 uA

ILI (32) = -0.012 709 uA

ILI (33) = -0.015 688 uA

ILI (34) = -0.006 153 uA

ILI (35) = -0.013 080 uA

ILI (36) = -0.013 778 uA

ILI (37) = -0.013 184 uA

ILI (38) = -0.016 535  $\mu$ A

ILI (39) = -0.018 039  $\mu$ A

PASS

以上测试数据为内存芯片的实测参数,包括 ICC 电源电流、FUN 功能测试、VOL 输出低电平电压、VOH 输出高电平电压、ILO 输出漏电流和 ILI 输入漏电流,将其与器件标准数据作比较,结果基本相符。由此可以判定此次采用的硬件算法图形产生器和新算法的图形向量是完全可行的,测试结果真实有效,满足了内存芯片的测试要求。

## 5 结 论

本文讲述了利用算法图形产生器提供内存芯片地址和改进图形向量算法的方法,实现了内存芯片快速测试,减少了测试程序开发周期,降低了开发费用,加快了测试速率,同时提高了图形向量故障覆盖率,对内存芯片测试产生了积极的影响。

### 参 考 文 献

- [1] MICHAEL L. BUSHNELL. 超大规模集成电路测试-数字存储器混合信号系统[M]. 北京:电子工业出版社,2005:75-101.
- [2] 许伟达. IC 测试原理-存储器和逻辑芯片的测试[J]. 半导体技术,2006,31(5):350-352.
- [3] 杨之廉. 集成电路导论[M]. 北京:清华大学出版社,2003:23-57.
- [4] 杨之廉,申明. 超大规模集成电路设计方法学导

论[M]. 北京:清华大学出版社,1999:35-52.

- [5] 程玲,陈护勋. 存储器测试算法的实现[J]. 计算机与数字工程,1998,26(5):17-21.
- [6] 曹海源,孙世宇,张志红. 一种可编程的通用存储器仿真测试系统[J]. 微计算机信息,2005,21(4):84-85.
- [7] RAJSUMAN R. Design and test of large embedded memories An overview[J]. IEEE Design and Test of computers,2001,18(3):16-27.
- [8] QUASEM M S, JIANG Z G. Benefits of a Soc-specific test methodology[J]. IEEE Design and test of computers,2003,20(3):68-77.
- [9] 王健. DDR 存储器的测试方法研究及实现[D]. 上海:上海交通大学,2004:40-51.
- [10] 汪静,欧阳红军,蒋薇. ATE 可计量性信息流建模与分析研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(11):2530-2508
- [11] 王续朝. 地址数据复用型 Flash 存储器测试技术研究[J]. 电子测试,2012,250(10):17-22.

### 作 者 简 介

赵雷莲,1980 年出生,硕士,工程师,主要研究方向为 IC 测试。

E-mail:zxd1213@163.com

杜宇,1981 年出生,本科,工程师,主要研究方向为 IC 测试。

E-mail:hubu609@163.com

(上接第 28 页)

- [8] 王红梅,严军,牛涛,等. 一种利用相关性优化压缩感知测量矩阵的方法[J]. 电子测量技术,2012,35(11):116-119.
- [9] TROPP J, LASKA J, DUADE M, et al. Beyond Nyquist: Efficient sampling of sparse band limited signals[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 2010, 56(1):520-544.
- [10] 樊敏. 基于压缩传感理论的模拟信号处理[D]. 合肥:安徽大学,2011:27-35.
- [11] MISHALI M, ELDAR Y C. Blind multi-band signal reconstruction: Compressed sensing for analog Signals[J]. IEEE Trans. on Signal Process. 2009,57(30):993-1009.
- [12] 石建波,李小波,陈学辟. 基于欠采样的稀疏多频带模拟信号恢复[J]. 电子对抗,2011(4):15-19.
- [13] 曹离然,郑挺. 多频带信号压缩采样的回溯 SOMP 重构方法[J]. 电子信息对抗技术,2012,27(4):41-46.

- [14] MISHALI M, ELDAR Y C. From theory to practice: Sub-nyquist sampling of sparse wideband analog signals[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2010,4(2):375-391.

### 作 者 简 介

秦乙,1990 年出生,装备学院硕士研究生,主要研究方向为电子对抗,压缩感知。

E-mail:hutianxie@126.com

朱卫纲,1973 年出生,装备学院硕士生导师,副教授,主要研究方向为空间信息对抗。

胡旭,1990 年出生,装备学院硕士研究生,主要研究方向为认知雷达。

舒奇泉,1989 年出生,装备学院硕士研究生,主要研究方向为电子对抗,压缩感知。