AFL漏洞挖掘技术漫谈（二）：Fuzz结果分析和代码覆盖率 - FreeBuf互联网安全新媒体平台

freebuf.com/articles/system/197678.html

alphalab

AFL漏洞挖掘技术漫谈（二）：Fuzz结果分析和代码覆盖率

一、前言

阿尔法实验在上一篇文章中向大家介绍了使用AFL开始模糊测试前要做的一些准备工作，以及AFL的几种工作方式，但是并没有提到何时结束测试过程，以及测试完成后又需要做些什么。本文中就继续介绍这些内容，并开始逐步介绍一些AFL相关原理，以下是本文中主要讨论的问题：

> 1. 何时结束Fuzzing工作
> 2. afl-fuzz生成了哪些文件
> 3. 如何对产生的crash进行验证和分类
> 4. 用什么来评估Fuzzing的结果
> 5. 代码覆盖率及相关概念
> 6. AFL是如何记录代码覆盖率的

二、Fuzzer工作状态

因为afl-fuzz永远不会停止，所以何时停止测试很多时候就是依靠afl-fuzz提供的状态来决定的。除了前面提到过的通过状态窗口、afl-whatsup查看afl-fuzz状态外，这里再补充几种方法。

1. afl-stat

afl-stat是afl-utils这套工具AFL辅助工具中的一个（这套工具中还有其他更好用的程序，后面用到时会做介绍），该工具类似于afl-whatsup的输出结果。

使用前需要一个配置文件，设置每个afl-fuzz实例的输出目录：

```
{
    "fuzz_dirs": [
        "/root/syncdir/SESSION000",
        "/root/syncdir/SESSION001",
   ...
   "/root/syncdir/SESSION00x"
    ]
}
```

然后指定配置文件运行即可：

```
$ afl-stats -c afl-stats.conf
[SESSION000 on fuzzer1]
 Alive:   1/1
 Execs:   64 m
 Speed:   0.3 x/s
 Pend:    6588/249
 Crashes: 101
[SESSION001 on fuzzer1]
 Alive:   1/1
 Execs:   105 m
 Speed:   576.6 x/s
 Pend:    417/0
 Crashes: 291
...
```

2. 定制afl-whatsup

afl-whatsup是依靠读afl-fuzz输出目录中的fuzzer_stats文件来显示状态的，每次查看都要需要手动执行，十分麻烦。因此可以对其进行修改，让其实时显示fuzzer的状态。方法也很简答，基本思路就是在所有代码外面加个循环就好，还可以根据自己的喜好做些调整：

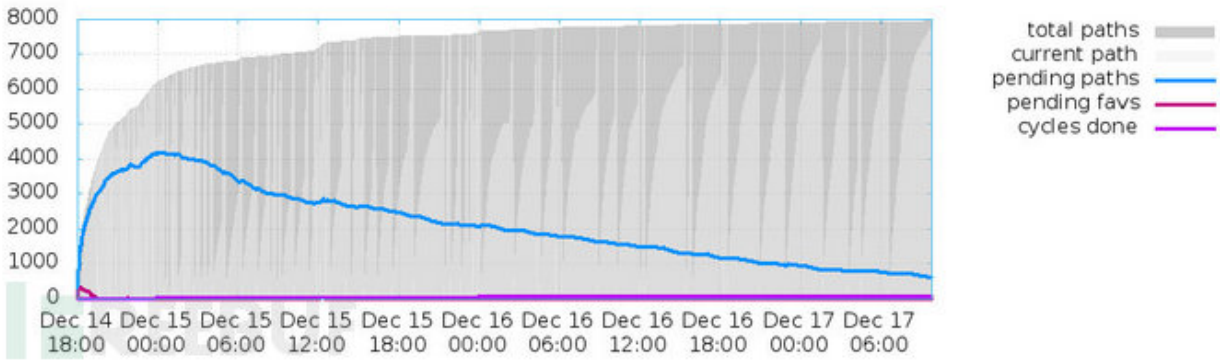
3. afl-plot

前面提到的都是基于命令行的工具，如果还想要更直观的结果，可以用afl-plot绘制各种状态指标的直观变化趋势。

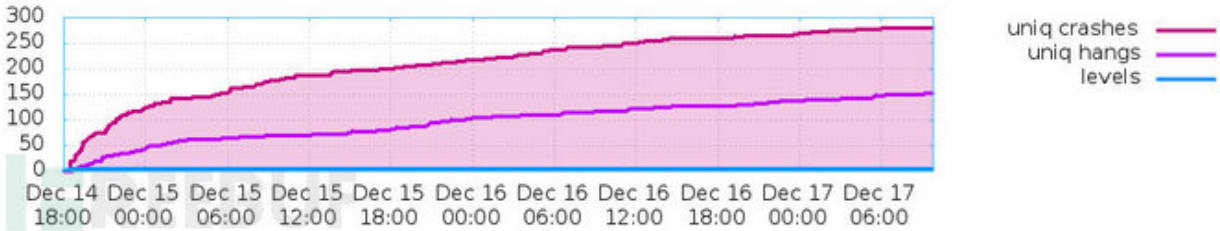
```
$ apt-get install gnuplot
$ afl-plot afl_state_dir graph_output_dir
```

以测试libtiff的情况为例，进入afl-plot输出目录，打开index.html，会看到下面三张图：

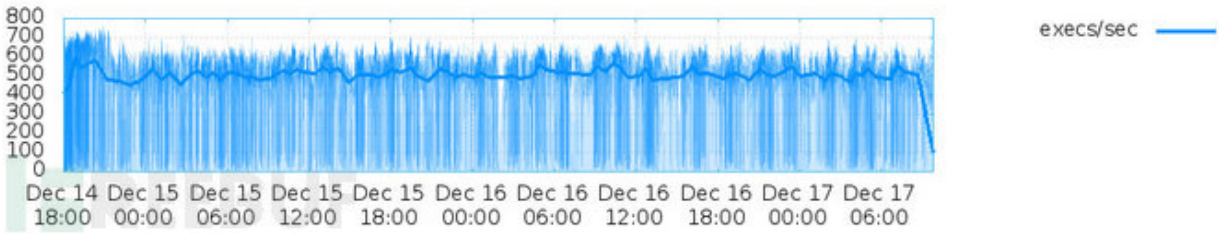
首先是路径覆盖的变化，当**pending fav**的数量变为零并且**total paths**数量基本上没有再增长时，说明fuzzer有新发现的可能性就很小了。



接着是崩溃和超时的变化

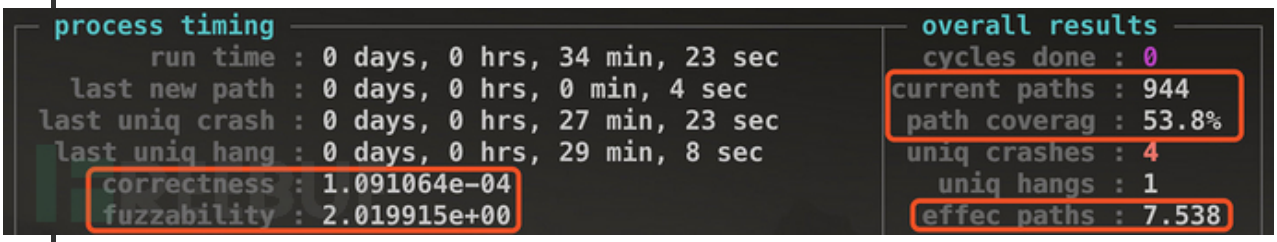


最后是执行速度的变化，这里要注意的是，如果随着时间的推移，执行速度越来越慢，有一种可能是因为fuzzer耗尽一些共享资源。



4. pythia

笔者在查阅资料的过程中，还发现了pythia这个AFL的扩展项目，虽然不知道效果如何，但这里还是顺便提一提。其特色在于可以估算发现新crash和path概率，其运行界面相比原版的AFL多出了下面几个字段：



correctness：在没有发现crash时，发现一个导致crash输入的概率。

fuzzability：表示在该程序中发现新路径的难度，该数值越高代表程序越容易Fuzz。

current paths：显示当前发现的路径数。

path coverag：路径覆盖率。

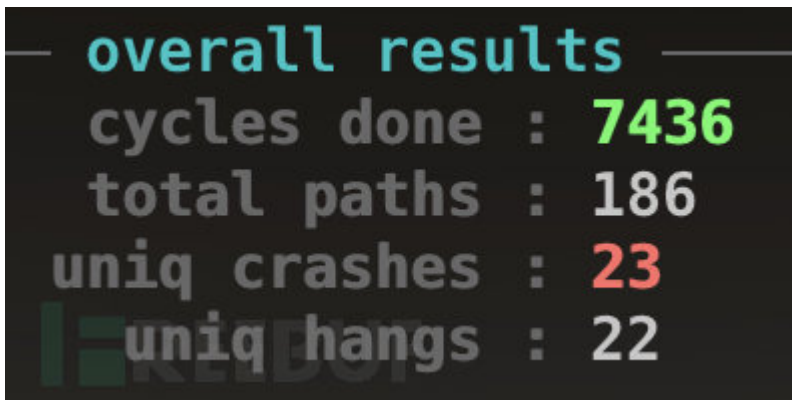
三、结束测试

1.何时结束

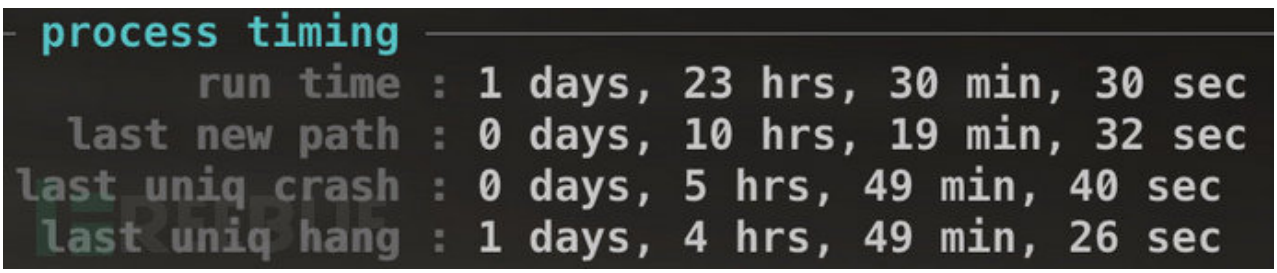
检查afl-fuzz工作状态的目的是为何时停止测试提供依据，通常来说符合下面几种情况时就可以停掉了。

（1）状态窗口中”cycles done”字段颜色变为绿色该字段的颜色可以作为何时停止测试的参考，随着周期数不断增大，其颜色也会由洋红色，逐步变为黄色、蓝色、绿色。当其变为绿色时，继续Fuzzing下去也很难有新的发现了，这时便可以通过Ctrl-C停止afl-fuzz。

（2）距上一次发现新路径（或者崩溃）已经过去很长时间了，至于具体多少时间还是需要自己把握，比如长达一个星期或者更久估计大家也都没啥耐心了吧。



（3）目标程序的代码几乎被测试用例完全覆盖，这种情况好像很少见，但是对于某些小型程序应



该还是可能的，至于如何计算覆盖率将在下面介绍。

（4）上面提到的pythia提供的各种数据中，一旦**path covera**达到99%（通常来说不太可能），如果不期望再跑出更多crash的话就可以中止fuzz了，因为很多crash可能是因为相同的原因导致的；还有一点就是**correctness**的值达到**1e-08**，根据pythia开发者的说法，这时从上次发现path/uniq crash到下一次发现之间大约需要1亿次执行，这一点也可以作为衡量依据。

2. 输出结果

afl-fuzz的输出目录中存在很多文件，有时想要写一个辅助工具可能就要用到其中的文件。下面以多个fuzz实例并行测试时的同步目录为例：

```
$ tree -L 3
.
├── fuzzer1
│   ├── crashes
│   │   ├── id:000000,sig:06,src:000019+000074,op:splice,rep:2
│   │   ├── ...
│   │   ├── id:000002,sig:06,src:000038+000125,op:splice,rep:4
│   │   └── README.txt
│   ├── fuzz_bitmap
│   ├── fuzzer_stats
│   ├── hangs
│   │   └── id:000000,src:000007,op:flip1,pos:55595
│   ├── plot_data
│   └── queue
│       ├── id:000000,orig:1.png
│ ├── ....
│       └── id:000101,sync:fuzzer10,src:000102
└── fuzzer2
    ├── crashes
    ├── ...
```

queue：存放所有具有独特执行路径的测试用例。

crashes：导致目标接收致命signal而崩溃的独特测试用例。

crashes/README.txt：保存了目标执行这些crash文件的命令行参数。

hangs：导致目标超时的独特测试用例。

fuzzer_stats：afl-fuzz的运行状态。

plot_data：用于afl-plot绘图。

四、处理测试结果

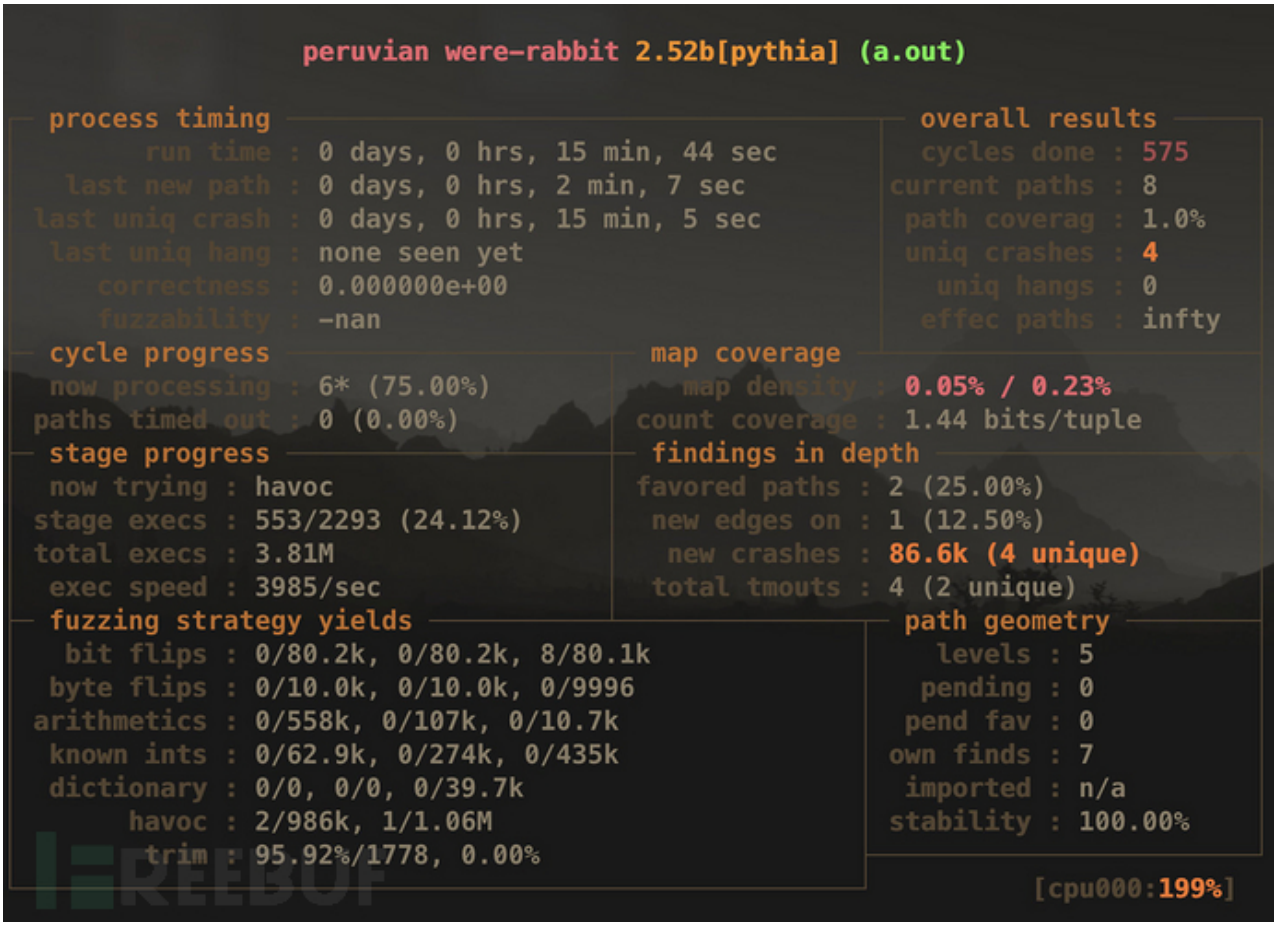
到了这里，我们可能已经跑出了一大堆的crashes，那么接下来的步骤，自然是确定造成这些crashes的bug是否可以利用，怎么利用？这是另一个重要方面。当然，个人觉得这比前面提到的内容都要困难得多，这需要对常见的二进制漏洞类型、操作系统的安全机制、代码审计和调试等内容

都有一定深度的了解。但如果只是对crash做简单的分析和分类，那么下面介绍的几种方法都可以给我们提供一些帮助。

1. crash exploration mode

这是afl-fuzz的一种运行模式，也称为**peruvian rabbit mode**，用于确定bug的可利用性，具体细节可以参考lcamtuf的博客。

```
$ afl-fuzz -m none -C -i poc -o peruvian-were-rabbit_out -- ~/src/LuPng/a.out @@ out.png
```



举个例子，当你发现目标程序尝试写入\跳转到一个明显来自输入文件的内存地址，那么就可以猜测这个bug应该是可以利用的；然而遇到例如NULL pointer dereferences这样的漏洞就没那么容易判断了。

将一个导致crash测试用例作为afl-fuzz的输入，使用-C选项开启crash exploration模式后，可以快速地产生很多和输入crash相关、但稍有些不同的crashes，从而判断能够控制某块内存地址的长度。这里笔者在实践中没有找到适合的例子，但在一篇文章中发现了一个很不错的例子——tcpdump栈溢出漏洞，crash exploration模式从一个crash产生了42个新的crash，并读取不同大小的相邻内存。

```
$ for i in `ls` ; do ASAN_OPTIONS=symbolize=1 ASAN_SYMBOLIZER_PATH=/usr/bin/llvm-symbolizer-3.5
tcpdump -ee -vv -nnr $i 2>&1 ; done  | grep READ | sort | uniq -c
     18 READ of size 102 at 0xffffb27e thread T0
     22 READ of size 102 at 0xffffb29e thread T0
      1 READ of size 62 at 0xffffb27e thread T0
      1 READ of size 62 at 0xffffb29e thread T0
```

2. triage_crashes

AFL源码的experimental目录中有一个名为triage_crashes.sh的脚本，可以帮助我们触发收集到的crashes。例如下面的例子中，11代表了SIGSEGV信号，有可能是因为缓冲区溢出导致进程引用了无效的内存；06代表了SIGABRT信号，可能是执行了abort\assert函数或double free导致，这些结果可以作为简单的参考。

```
$ ~/afl-2.52b/experimental/crash_triage/triage_crashes.sh fuzz_out ~/src/LuPng/a.out @@
out.png 2>&1 | grep SIGNAL
   +++ ID 000000, SIGNAL 11 +++
   +++ ID 000001, SIGNAL 06 +++
   +++ ID 000002, SIGNAL 06 +++
   +++ ID 000003, SIGNAL 06 +++
   +++ ID 000004, SIGNAL 11 +++
   +++ ID 000005, SIGNAL 11 +++
   +++ ID 000006, SIGNAL 11 +++
   ...
```

3. crashwalk

当然上面的两种方式都过于鸡肋了，如果你想得到更细致的crashes分类结果，以及导致crashes的具体原因，那么crashwalk就是不错的选择之一。这个工具基于gdb的exploitable插件，安装也相对简单，在ubuntu上，只需要如下几步即可：

```
$ apt-get install gdb golang
$ mkdir tools
$ cd tools
$ git clone https://github.com/jfoote/exploitable.git
$ mkdir go
$ export GOPATH=~/tools/go
$ export CW_EXPLOITABLE=~/tools/exploitable/exploitable/exploitable.py
$ go get -u github.com/bnagy/crashwalk/cmd/...
```

crashwalk支持AFL/Manual两种模式。前者通过读取**crashes/README.txt**文件获得目标的执行命令（前面第三节中提到的），后者则可以手动指定一些参数。两种使用方式如下：

```
#Manual Mode
$ ~/tools/go/bin/cwtriage -root syncdir/fuzzer1/crashes/ -match id -- ~/parse @@
#AFL Mode
$ ~/tools/go/bin/cwtriage -root syncdir -afl
```

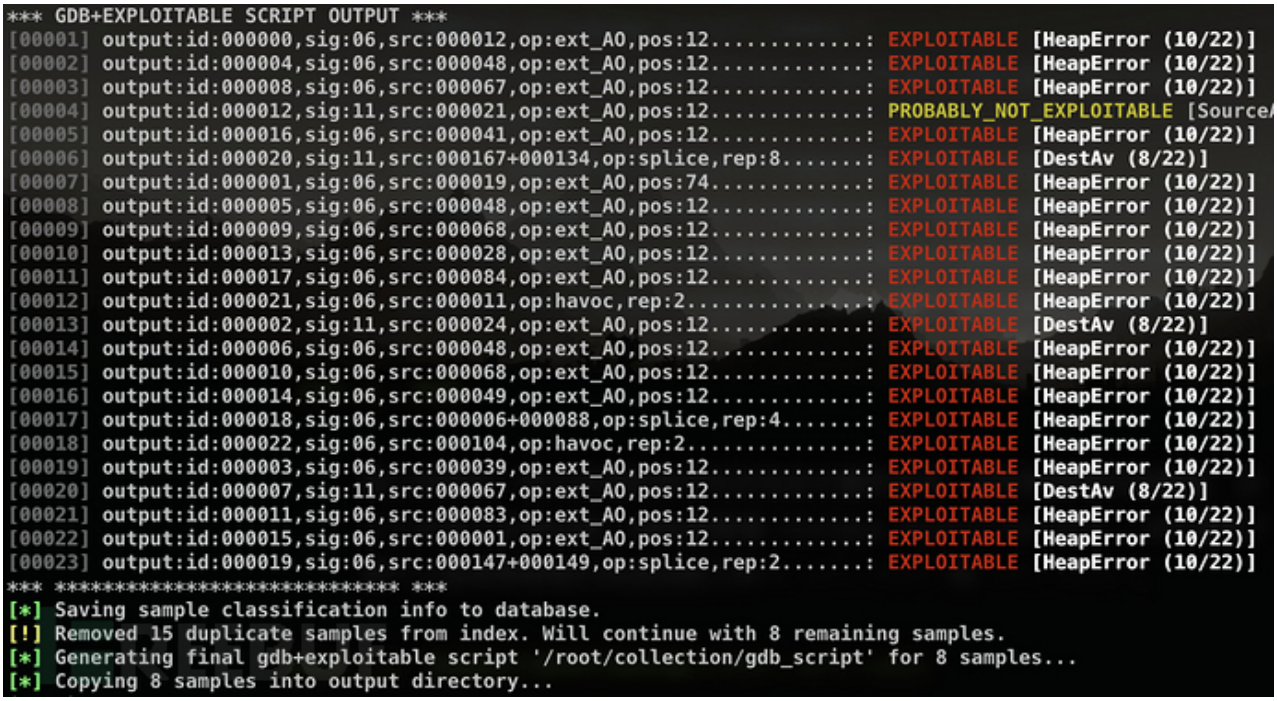
两种模式的输出结果都一样，如上图所示。这个工具比前面几种方法要详细多了，但当有大量crashes时结果显得还是十分混乱。

4. afl-collect

最后重磅推荐的工具便是afl-collect，它也是afl-utils套件中的一个工具，同样也是基于exploitable来检查crashes的可利用性。它可以自动删除无效的crash样本、删除重复样本以及自动化样本分类。使用起来命令稍微长一点，如下所示：

```
$ afl-collect -j 8 -d crashes.db -e gdb_script ./afl_sync_dir ./collection_dir --
/path/to/target --target-opts
```

但是结果就像下面这样非常直观：



五、代码覆盖率及其相关概念

代码覆盖率是模糊测试中一个极其重要的概念，**使用代码覆盖率可以评估和改进测试过程，执行到的代码越多，找到bug的可能性就越大**，毕竟，在覆盖的代码中并不能100%发现bug，在未覆盖的代码中却是100%找不到任何bug的，所以本节中就将详细介绍代码覆盖率的相关概念。

1. 代码覆盖率（Code Coverage）

代码覆盖率是一种度量代码的覆盖程度的方式，也就是指源代码中的某行代码是否已执行；对二进制程序，还可将此概念理解为汇编代码中的某条指令是否已执行。其计量方式很多，但无论是GCC的GCOV还是LLVM的SanitizerCoverage，都提供函数（function）、基本块（basic-block）、边界（edge）三种级别的覆盖率检测，更具体的细节可以参考LLVM的官方文档。

2. 基本块（Basic Block）

缩写为BB，指一组顺序执行的指令，BB中第一条指令被执行后，后续的指令也会被全部执行，每个BB中所有指令的执行次数是相同的，也就是说一个BB必须满足以下特征：

> 只有一个入口点，BB中的指令不是任何**跳转指令**的目标。
>
> 只有一个退出点，只有最后一条指令使执行流程转移到另一个BB

将上面的程序拖进IDA，可以看到同样被划分出了4个基本块：

```
w = 0;
x = x + y;
if( x > z ){
   y = x;
   x++;
} else {
   y = z;
   z++;
}
w = x + z;
```

```
w = 0;
x = x + y;
if( x > z ){
```

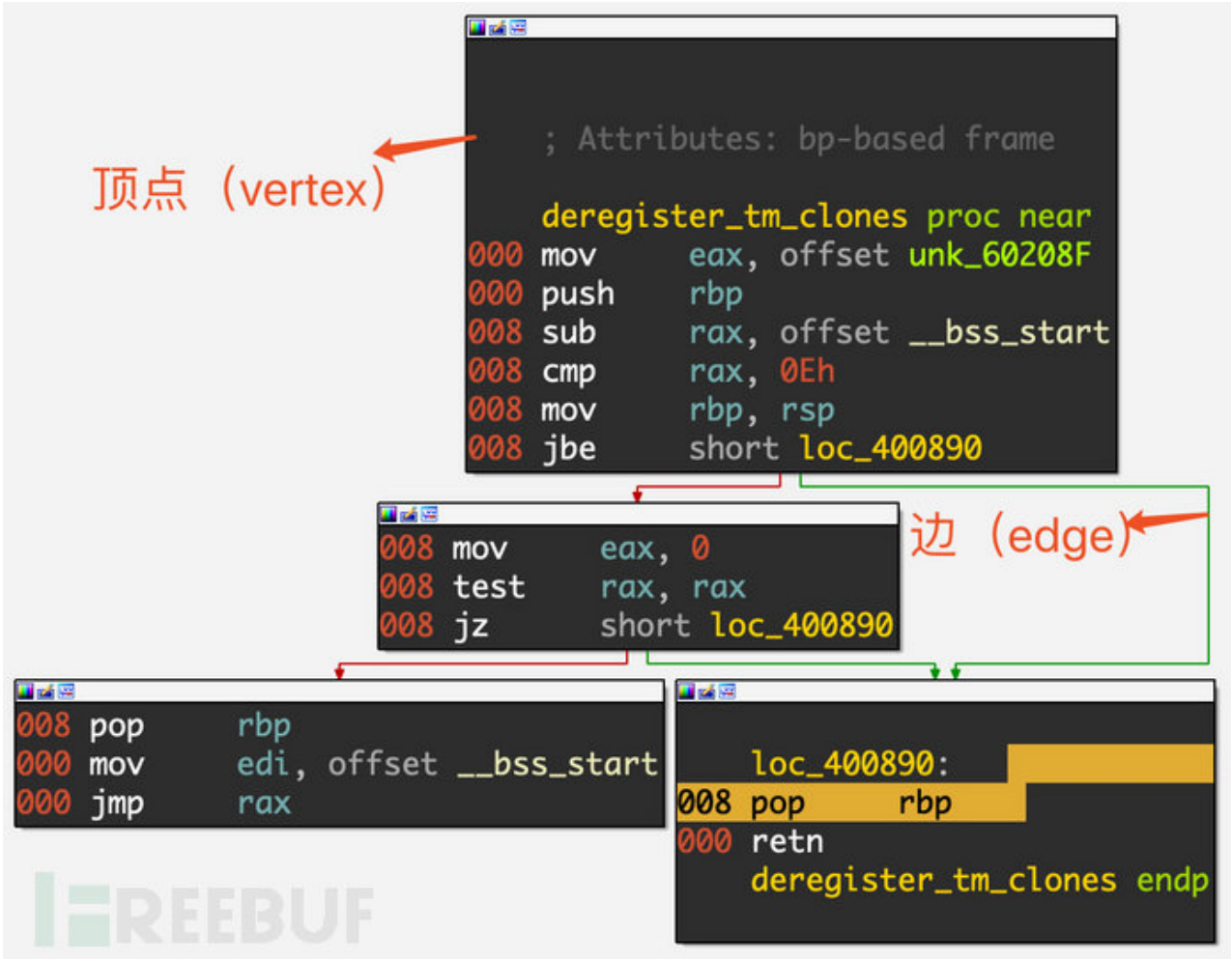
```
   y = x;
   x++;
```

```
   y = z;
   z++;
```

```
w = x + z;
```

3. 边（edge）

AFL的技术白皮书中提到fuzzer通过插桩代码捕获边（edge）覆盖率。那么什么是edge呢？我们可以将程序看成一个控制流图（CFG），图的每个节点表示一个基本块，而edge就被用来表示在基本块之间的转跳。知道了每个基本块和跳转的执行次数，就可以知道程序中的每个语句和分支的执行次数，从而获得比记录BB更细粒度的覆盖率信息。

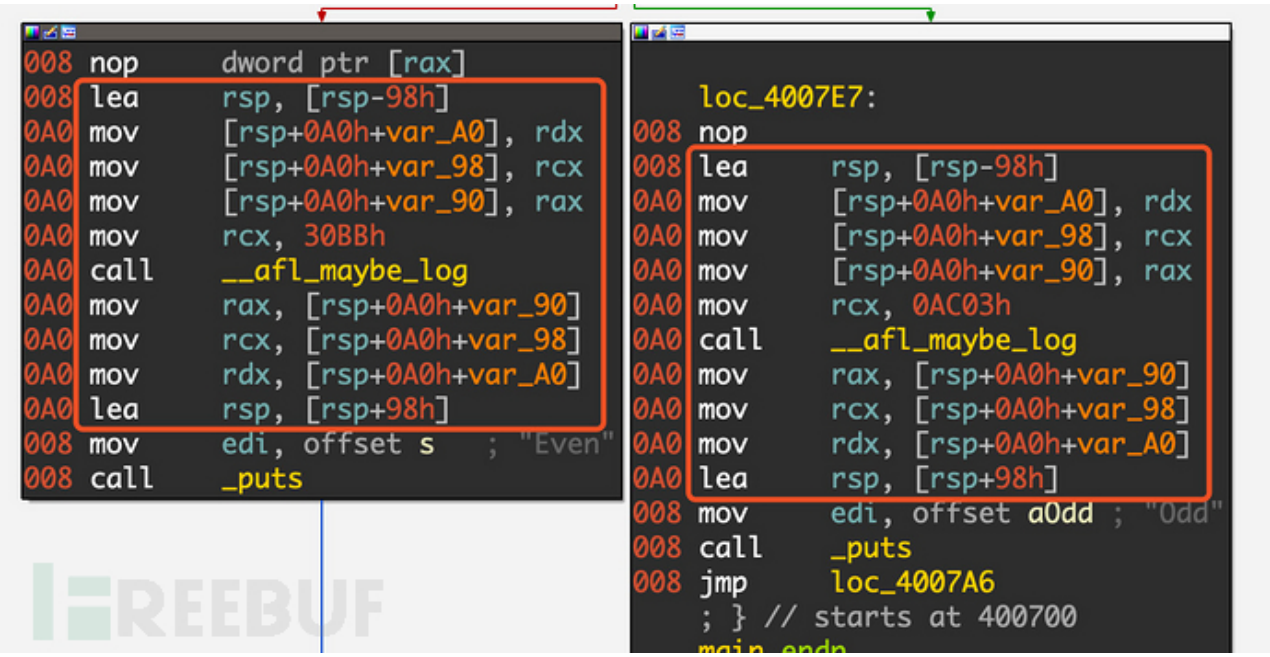


4. 元组（tuple）

具体到AFL的实现中，使用二元组(branch_src, branch_dst)来记录**当前基本块 + 前一基本块** 的信息，从而获取目标的执行流程和代码覆盖情况，伪代码如下：

```
cur_location = <COMPILE_TIME_RANDOM>;//用一个随机数标记当前基本块
shared_mem[cur_location ^ prev_location]++;//将当前块和前一块异或保存到shared_mem[]
prev_location = cur_location >> 1;//cur_location右移1位区分从当前块到当前块的转跳
```

实际插入的汇编代码，如下图所示，首先保存各种寄存器的值并设置ecx/rcx，然后调用 `__afl_maybe_log` ，这个方法的内容相当复杂，这里就不展开讲了，但其主要功能就和上面的伪代码相似，用于记录覆盖率，放入一块共享内存中。



六、计算代码覆盖率

了解了代码覆盖率相关的概念后，接下来看看如何计算我们的测试用例对前面测试目标的代码覆盖率。

这里需要用到的工具之一是**GCOV**，它随gcc一起发布，所以不需要再单独安装，和afl-gcc插桩编译的原理一样，gcc编译时生成插桩的程序，用于在执行时生成代码覆盖率信息。

另外一个工具是**LCOV**，它是GCOV的图形前端，可以收集多个源文件的gcov数据，并创建包含使用覆盖率信息注释的源代码HTML页面。

最后一个工具是afl-cov，可以快速帮助我们调用前面两个工具处理来自afl-fuzz测试用例的代码覆盖率结果。在ubuntu中可以使用 `apt-get install afl-cov` 安装afl-cov，但这个版本似乎不支持分支覆盖率统计，所以还是从Github下载最新版本为好，下载完无需安装直接运行目录中的Python脚本即可使用：

```
$ apt-get install lcov
$ git clone https:
$ ./afl-cov/afl-cov -V
afl-cov-0.6.2
```

还是以Fuzz libtiff为例，计算Fuzzing过程的代码覆盖率流程如下：

第一步，使用gcov重新编译源码，在CFLAGS中添加 `"-fprofile-arcs"` 和 `"-ftest-coverage"` 选项，可以在 `--prefix` 中重新指定一个新的目录以免覆盖之前alf插桩的二进制文件。

```
$ make clean
$ ./configure --prefix=/root/tiff-4.0.10/build-cov CC="gcc" CXX="g++" CFLAGS="-fprofile-arcs -ftest-coverage" --disable-shared
$ make
$ make install
```

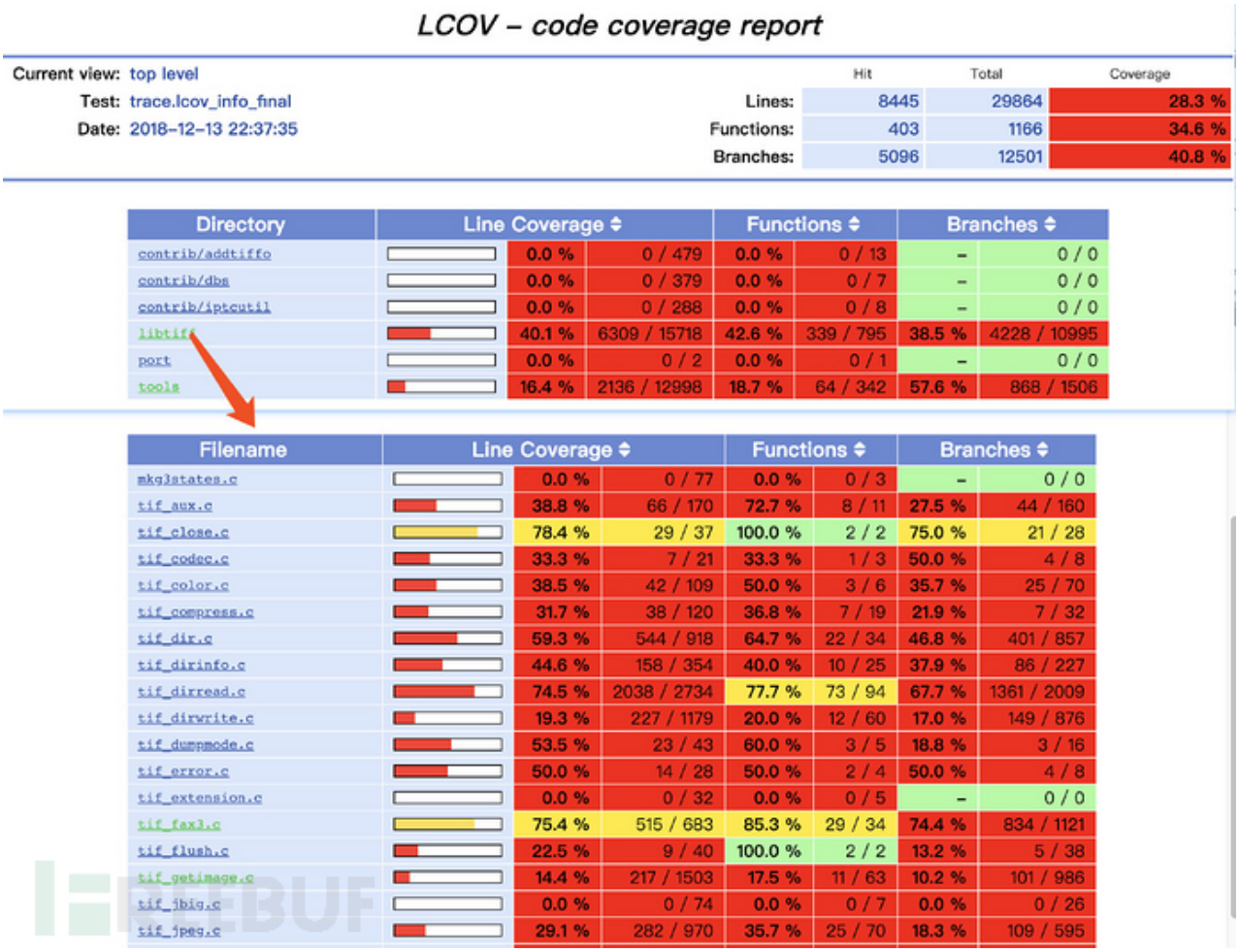
第二步，执行afl-cov。其中-d选项指定afl-fuzz输出目录；—live用于处理一个还在实时更新的AFL目录，当afl-fuzz停止时，afl-cov将退出；–enable-branch-coverage用于开启边缘覆盖率（分支覆盖率）统计；-c用于指定源码目录；最后一个-e选项用来设置要执行的程序和参数，其中的AFL_FILE和afl中的”@@”类似，会被替换为测试用例，LD_LIBRARY_PATH则用来指定程序的库文件。

```
$ cd ~/tiff-4.0.10
$ afl-cov -d ~/syncdir --live --enable-branch-coverage -c . -e "cat AFL_FILE | LD_LIBRARY_PATH=./build-cov/lib ./build-cov/bin/tiff2pdf AFL_FILE"
```

成功执行的结果如下所示：

我们可以通过—live选择，在fuzzer运行的同时计算覆盖率，也可以在测试结束以后再进行计算，最后会得到一个像下面这样的html文件。它既提供了概述页面，显示各个目录的覆盖率；也可以在点击进入某个目录查看某个具体文件的覆盖率。

点击进入每个文件，还有更详细的数据。每行代码前的数字代表这行代码被执行的次数，没有执行过的代码会被红色标注出来。



LCOV – code coverage report

Current view:	top level		Hit	Total	Coverage
Test:	trace.lcov_info_final	Lines:	8445	29864	28.3 %
Date:	2018-12-13 22:37:35	Functions:	403	1166	34.6 %
		Branches:	5096	12501	40.8 %

Directory	Line Coverage		Functions		Branches	
contrib/addtiffo	0.0 %	0 / 479	0.0 %	0 / 13	-	0 / 0
contrib/dbs	0.0 %	0 / 379	0.0 %	0 / 7	-	0 / 0
contrib/iptcutil	0.0 %	0 / 288	0.0 %	0 / 8	-	0 / 0
libtiff	40.1 %	6309 / 15718	42.6 %	339 / 795	38.5 %	4228 / 10995
port	0.0 %	0 / 2	0.0 %	0 / 1	-	0 / 0
tools	16.4 %	2136 / 12998	18.7 %	64 / 342	57.6 %	868 / 1506

Filename	Line Coverage		Functions		Branches	
mkg3states.c	0.0 %	0 / 77	0.0 %	0 / 3	-	0 / 0
tif_aux.c	38.8 %	66 / 170	72.7 %	8 / 11	27.5 %	44 / 160
tif_close.c	78.4 %	29 / 37	100.0 %	2 / 2	75.0 %	21 / 28
tif_codec.c	33.3 %	7 / 21	33.3 %	1 / 3	50.0 %	4 / 8
tif_color.c	38.5 %	42 / 109	50.0 %	3 / 6	35.7 %	25 / 70
tif_compress.c	31.7 %	38 / 120	36.8 %	7 / 19	21.9 %	7 / 32
tif_dir.c	59.3 %	544 / 918	64.7 %	22 / 34	46.8 %	401 / 857
tif_dirinfo.c	44.6 %	158 / 354	40.0 %	10 / 25	37.9 %	86 / 227
tif_dirread.c	74.5 %	2038 / 2734	77.7 %	73 / 94	67.7 %	1361 / 2009
tif_dirwrite.c	19.3 %	227 / 1179	20.0 %	12 / 60	17.0 %	149 / 876
tif_dumpmode.c	53.5 %	23 / 43	60.0 %	3 / 5	18.8 %	3 / 16
tif_error.c	50.0 %	14 / 28	50.0 %	2 / 4	50.0 %	4 / 8
tif_extension.c	0.0 %	0 / 32	0.0 %	0 / 5	-	0 / 0
tif_fax3.c	75.4 %	515 / 683	85.3 %	29 / 34	74.4 %	834 / 1121
tif_flush.c	22.5 %	9 / 40	100.0 %	2 / 2	13.2 %	5 / 38
tif_getimage.c	14.4 %	217 / 1503	17.5 %	11 / 63	10.2 %	101 / 986
tif_jbig.c	0.0 %	0 / 74	0.0 %	0 / 7	0.0 %	0 / 26
tif_jpeg.c	29.1 %	282 / 970	35.7 %	25 / 70	18.3 %	109 / 595

```
815                :          0 :                                (long) 1, (long) (already_read + to_read));
816                :          0 :                    return TIFFReadDirEntryErrAlloc;
817                :            :                }
818                :          0 :                *pdest = new_dest;
819                :            :
820                :          0 :                bytes_read = TIFFReadFile(tif,
821                :            :                    (char*)*pdest + already_read, to_read);
822                :          0 :                already_read += bytes_read;
823        [  #   #  ]:          0 :                if (bytes_read != to_read) {
824                :          0 :                    return TIFFReadDirEntryErrIo;
825                :            :                }
826                :            :            }
827                :          0 :            return TIFFReadDirEntryErrOk;
828                :            : }
829                :            :
830                :    1534370 : static enum TIFFReadDirEntryErr TIFFReadDirEntryArrayWithLimit(
831                :            :     TIFF* tif, TIFFDirEntry* direntry, uint32* count, uint32 desttypesize,
832                :            :     void** value, uint64 maxcount)
833                :            : {
834                :            :         int typesize;
835                :            :         uint32 datasize;
836                :            :         void* data;
837                :            :         uint64 target_count64;
838                :    1534370 :         typesize=TIFFDataWidth(direntry->tdir_type);
839                :            :
840                :    1534370 :         target_count64 = (direntry->tdir_count > maxcount) ?
841                :    1534370 :                 maxcount : direntry->tdir_count;
842                :            :
843  [  +   +  ][  -   +  ]:    1534370 :         if ((target_count64==0)||(typesize==0))
844                :            :         {
845                :      53331 :                 *value=0;
846                :      53331 :                 return(TIFFReadDirEntryErrOk);
```

参考资料

[1] Fuzzing with AFL

[2] INTRO TO AMERICAN FUZZY LOP – FUZZING WITH ASAN AND BEYOND

[3] Clang 9 documentation – SanitizerCoverage

[4] honggfuzz漏洞挖掘技术深究系列

[5]How Much Test Coverage Is Enough For Your Testing Strategy?