Breaking Random() Internals For Fun!

Ismael Gómez Esquilichi

whoami

Estudiante de Ingeniería de la Ciberseguridad

Becario en el grupo de investigación GRAFO

Seguridad ofensiva en Vexcel Spain

A veces juego CTFs con *base64* y *John Keys*

Intentando romper cacharros con *IoTaK0s*

@esquilichii en y

Índice

Introducción

- Es muy importante elegir números aleatorios en un montón de aplicaciones
- No se le presta mucha atención, pero es muy importante poder generar números aleatorios en un ordenador

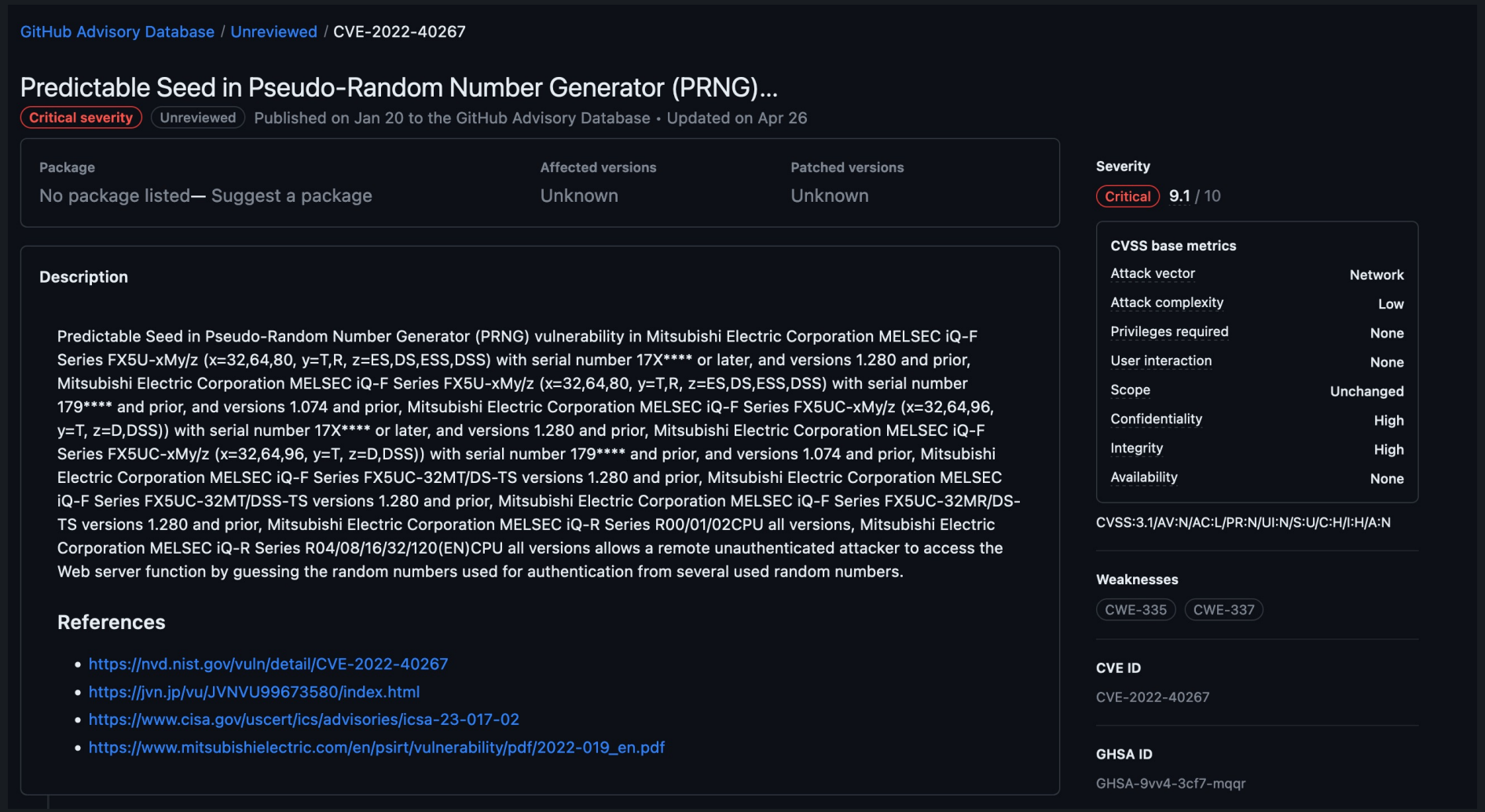
Introducción

- Es muy importante elegir números aleatorios en un montón de aplicaciones
- No se le presta mucha atención, pero es muy importante poder generar números aleatorios en un ordenador
- Si nos llevamos este concepto a una persona... ¿Somos buenos generadores de números?
  - No, si pedimos a mucha gente elegir un número entre 0 y 100 observamos lo siguiente
    - Son mucho más frecuentes los acabados en 3 y 7
    - Muy poco frecuentes los acabados en 0 y 5
- ¿Lo harán mejor las máquinas?

Introducción

- Entonces, ¿que hacen las funciones que generan números aleatorios en distintos lenguajes?
  - Python -> random()
  - PHP -> rand() & mt_rand()
  - C -> rand()
  - Java -> Random()
- Cada implementación es distinta, pero todas las mencionadas generan números *pseudoaleatorios*, ya que para una máquina es imposible generar números aleatorios puros
- La mayoría de ellas se enfocan en conseguir números suficientemente aleatorios para diversos casos de uso

Introducción



GitHub Advisory Database / Unreviewed / CVE-2022-40267

Predictable Seed in Pseudo-Random Number Generator (PRNG)...

Critical severity | Unreviewed | Published on Jan 20 to the GitHub Advisory Database • Updated on Apr 26

Package	Affected versions	Patched versions
No package listed— Suggest a package	Unknown	Unknown

Description

Predictable Seed in Pseudo-Random Number Generator (PRNG) vulnerability in Mitsubishi Electric Corporation MELSEC iQ-F Series FX5U-xMy/z (x=32,64,80, y=T,R, z=ES,DS,ESS,DSS) with serial number 17X**** or later, and versions 1.280 and prior, Mitsubishi Electric Corporation MELSEC iQ-F Series FX5U-xMy/z (x=32,64,80, y=T,R, z=ES,DS,ESS,DSS) with serial number 179**** and prior, and versions 1.074 and prior, Mitsubishi Electric Corporation MELSEC iQ-F Series FX5UC-xMy/z (x=32,64,96, y=T, z=D,DSS)) with serial number 17X**** or later, and versions 1.280 and prior, Mitsubishi Electric Corporation MELSEC iQ-F Series FX5UC-xMy/z (x=32,64,96, y=T, z=D,DSS)) with serial number 179**** and prior, and versions 1.074 and prior, Mitsubishi Electric Corporation MELSEC iQ-F Series FX5UC-32MT/DS-TS versions 1.280 and prior, Mitsubishi Electric Corporation MELSEC iQ-F Series FX5UC-32MT/DSS-TS versions 1.280 and prior, Mitsubishi Electric Corporation MELSEC iQ-F Series FX5UC-32MR/DS-TS versions 1.280 and prior, Mitsubishi Electric Corporation MELSEC iQ-R Series R00/01/02CPU all versions, Mitsubishi Electric Corporation MELSEC iQ-R Series R04/08/16/32/120(EN)CPU all versions allows a remote unauthenticated attacker to access the Web server function by guessing the random numbers used for authentication from several used random numbers.

References

- https://nvd.nist.gov/vuln/detail/CVE-2022-40267
- https://jvn.jp/vu/JVNVU99673580/index.html
- https://www.cisa.gov/uscert/ics/advisories/icsa-23-017-02
- https://www.mitsubishielectric.com/en/psirt/vulnerability/pdf/2022-019_en.pdf

Severity

Critical 9.1 / 10

CVSS base metrics

Attack vector	Network
Attack complexity	Low
Privileges required	None
User interaction	None
Scope	Unchanged
Confidentiality	High
Integrity	High
Availability	None

CVSS:3.1/AV:N/AC:L/PR:N/UI:N/S:U/C:H/I:H/A:N

Weaknesses

CWE-335 CWE-337

CVE ID

CVE-2022-40267

GHSA ID

GHSA-9vv4-3cf7-mqqr

java.util.Random()

- Es una clase en Java que se utiliza para generar secuencias de números pseudoaleatorios
  - Aunque los números que genera parecen aleatorios, en realidad son producidos de una manera determinista basada en una semilla inicial
- Tiene usos muy variados y distintos
  - Generación de Tokens (hmmm...)
  - Simulaciones
  - Generación de datos
  - Testing
  - Juegos

java.util.Random()

- Está implementado como un generador congruente lineal (LCG)
- Funciona muy rápido ya que solo se compone de 4 operaciones
  - {MUL - SUM - AND - ROL}
- No es criptográficamente seguro, se puede predecir el estado
- Por defecto, usa *System.nanoTime()* como semilla si no se especifica una

java.util.Random()

java.util.Random()

```
private static final long multiplier = 0x5DEECE66DL;
private static final long addend = 0xBL;
private static final long mask = (1L << 48) - 1;


protected int next(int bits) {
    long oldseed, nextseed;
    AtomicLong seed = this.seed;
    do {

        oldseed = seed.get();
        nextseed = (oldseed * multiplier + addend) & mask;

    } while (!seed.compareAndSet(oldseed, nextseed));
        return (int)(nextseed >>> (48 - bits));
 }
```

java.util.Random()

- Vamos a hablar del método *nextInt(int bound)*
- Genera un número aleatorio entre 0 (inclusivo) y el parámetro *bound* (exclusivo)
- Se hace una llamada a ***next(31)*** para generar un entero de 32 bits (ignorando el bit de signo evitando negativos)
- Si *bound* es potencia de 2, se puede obtener el número multiplicando
  - (r * bound) >> 31
- Si no se cumple, se hace un bucle para garantizar uniformidad
  - Poco probable cuando *bound* es pequeño, para romper RSU *nos da igual*

Generador Congruente Lineal

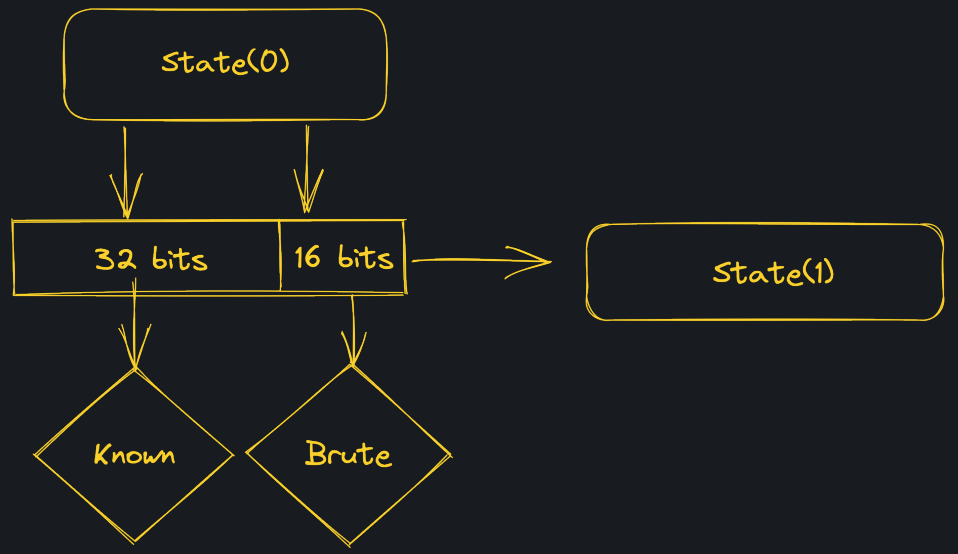
$$number_i + 1 = (A * number_i + C) \ mod \ M$$

$$A = 0x5DEECE66D \ , C = 0xB \ , M = 2^{48}$$

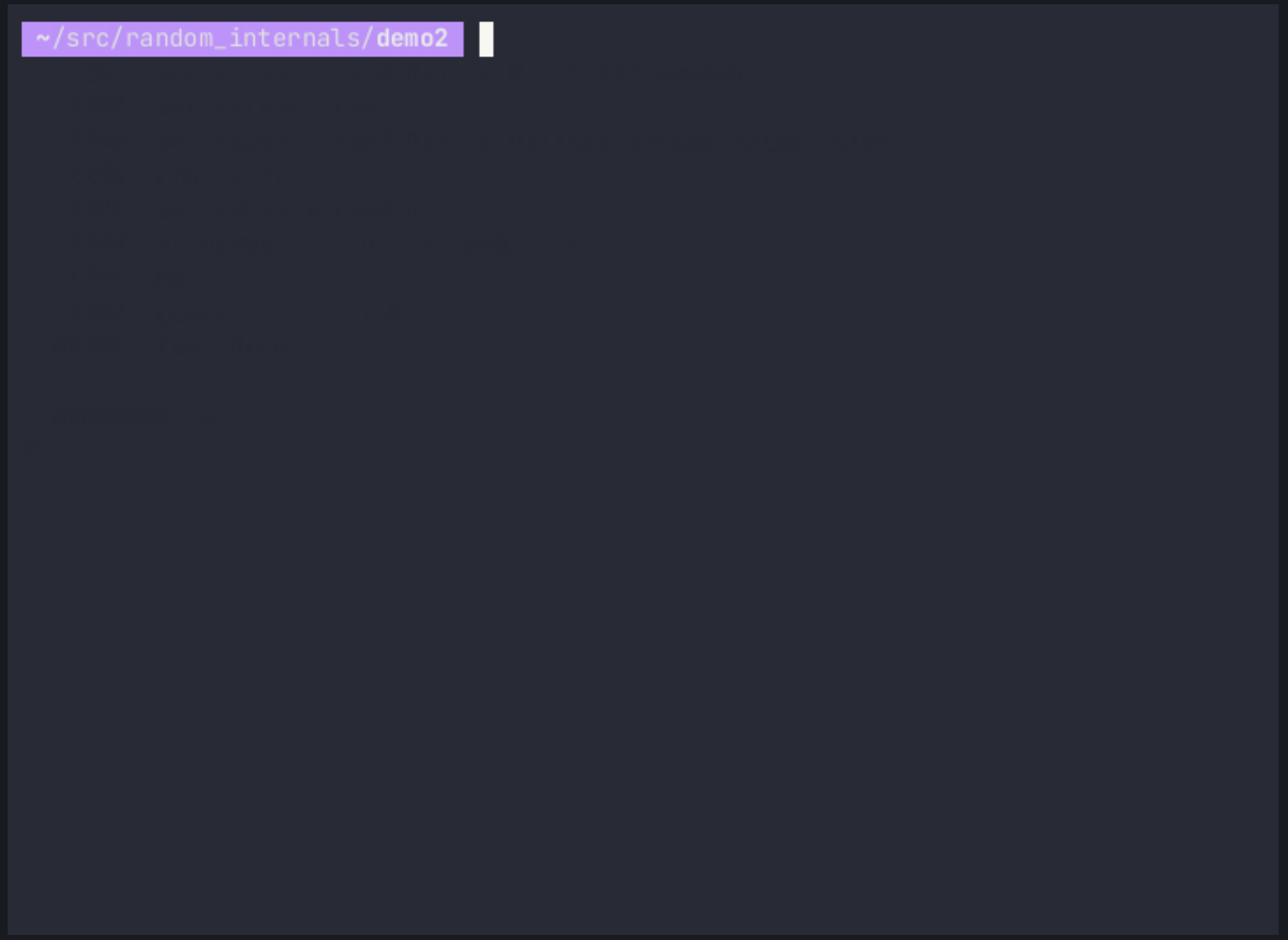
Generador Congruente Lineal

- Si conocemos el valor de x_i podemos predecir x_{i+n}

- No conocemos todo el valor de x_i ya que Random( ) no da más de 32 bits del estado interno (semilla)
  - Ataque de fuerza bruta los 16 bits restantes es trivial, milisegundos

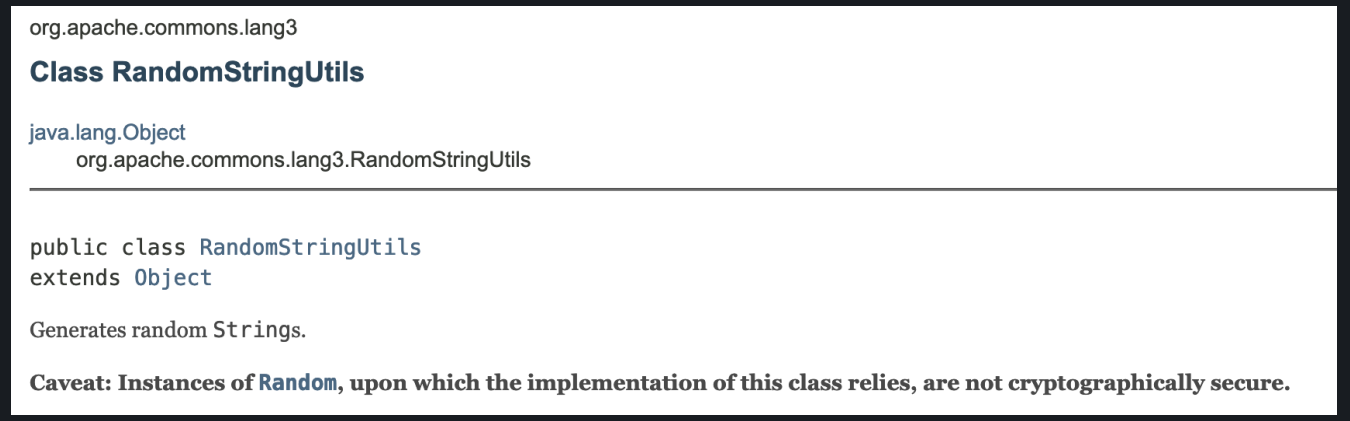


Generador Congruente Lineal



Random String Utils

- *“Apache Commons Lang 3”* es una librería que proporciona todo tipo de utilidades
  - Siendo una de ellas la clase RandomStringUtils
- La llamada al método *RandomStringUtils.randomAlphanumeric(count)* devuelve un string que contiene *count* caracteres
- En la propia documentación de la clase, está escrito que la implementación NO es criptográficamente segura
  - Únicamente se contempla su uso en casos muy simples



org.apache.commons.lang3

Class RandomStringUtils

java.lang.Object
    org.apache.commons.lang3.RandomStringUtils

```
public class RandomStringUtils
extends Object
```

Generates random Strings.

Caveat: Instances of Random, upon which the implementation of this class relies, are not cryptographically secure.

Random String Utils

```
def random_alphanumeric(count):
    start = ord(' ')
    end = ord('z') + 1
    gap = end - start # gap == 91
    out = ''
    while len(out) < count:
        code_point = next_int(gap) + start
        if chr(code_point).isalnum():
          out += chr(code_point)
  return out
```

Random String Utils

- Para romper RSU, el problema en realidad es romper *Random.nextInt(91)* dado outputs *casi* consecutivos
  - Se computa *nextInt(91) + 32*
  - Hay 62 carácteres
  - El $62/91 \approx 68.1\%$ de las veces la letra generada será usada
  - El $29/91 \approx 32.9\%$ de las veces será una letra no válida y habrá que generar otra
  - Como consecuencia, si la letra no es válida, nos saltamos un output de *nextInt(91)*

Random String Utils

Random String Utils (1º Ataque)

- $y_i = c_i - 32$ será el output i de *nextInt(91)*
  - Asumiremos que no nos saltamos ninguna generación

Random String Utils (1º Ataque)

- $y_i = c_i - 32$ será el output i de *nextInt(91)*
  - Asumiremos que no nos saltamos ninguna generación

$$y_i = (x_i >> 17) \, mod \, 91$$

- x_i es el estado del LCG (48 bits).
- La operación ROR (Rotate Right) se hace por *next(31)* que se llama desde *nextInt(91)*

Random String Utils (1º Ataque)

- $y_i = c_i - 32$ será el output i de *nextInt(91)*
  - Asumiremos que no nos saltamos ninguna generación

$$y_i = (x_i >> 17) \, mod \, 91$$

- x_i es el estado del LCG (48 bits).
- La operación ROR (Rotate Right) se hace por *next(31)* que se llama desde *nextInt(91)*
- Podemos reescribir esta ecuación como la siguiente:

$$y_i = (x_i >> 17) + 91k_1$$

Random String Utils (1º Ataque)

$$y_i = (x_i >> 17) + 91k_1$$

- k_1 es un entero que satisface la restricción $|k_1| < [2^{31}/91]$
  - Recordemos que x_i es un número de 31 bits
  - Eso significa que k_1 debe ser tal que cuando 91 se multiplique por él, no supere 2^{31}

Ejemplo

$$y_i = (x_i >> 17) + 91k_1$$

Para x_i = 125829120

1. x_i >> 17 = 960
2. y_i = 960 mod 91 = 50
3. Si y_i = 50, la ecuación queda como 50 = 960 + 91k_1
4. Por lo tanto, k_1 = -10

Random String Utils (1º Ataque)

- Esta ecuación nos da la idea para el primer ataque mejor que hacer fuerza bruta a 2^{48} posibles valores de semilla

$$y_i = (x_i >> 17) + 91k_1$$

1. Bruteforce a todos los posibles valores de k_1
2. Calcular $y_i - 91k_1$ nos da un candidato para $x_i \gg 17$
3. Para cada candidato, realizar fuerza bruta sobre todos los 2^{17} posibles valores
4. La cantidad total de fuerza bruta requerida para este ataque es de aproximadamente $\left[\frac{2^{31}}{91}\right] * 2^{17} \approx 2^{41.5}$

- Técnica descubierta por [alex91ar/randomstringutils]

Random String Utils (1º Ataque)

```
[ubuntu@armvps ~/src]$ ./random -b
Cracks RandomStringUtils.RandomAlphaNumeric()
By Alejo Popovici @alex91dotar (Apok)

=== Benchmark Mode ===
[*] Original token provided: TPIjPBmthTbDqZVH3GOXUW6rJoy7rV
[*] Size of token:30
[+] Cracking state...
[*] Number of threads: 4
[*] Starting from state: 211039265751040.
[*] State = 212602633940717
[*] 40.5 bits cracked in 31.530331 seconds.
[*] To crack the state would take a maximum of 5707.599609 seconds.
[*] Or 1.585444 hours.
[+] Bye!
```

Random String Utils (2º Ataque)

- Vamos a seguir mirando esta ecuación a ver si conseguimos sacar algo más de información que solo usando un único output

$$y_2 = (x_2 >> 17) \, mod \, 91$$

- Se puede escribir la anterior ecuación como:

$$y_2 = (((Ax_1 + C) \, mod \, M) >> 17) \, mod \, 91$$

- Lo único que no conocemos en esta ecuación es x_i

Random String Utils (2º Ataque)

$$x_1 = x_{1,U_{31}} + x_{1,L_{17}}$$

$$\begin{aligned}
& y_2 = (((A(x_{1,U_{31}} + x_{1,L_{17}}) + C) \mod M) \gg 17) \mod 91 \\
\implies & y_2 = (((Ax_{1,U_{31}} + Ax_{1,L_{17}} + C) \mod M) \gg 17) \mod 91 \\
\implies & y_2 = (((((Ax_{1,U_{31}} + C) \mod M) \\
& \qquad + (Ax_{1,L_{17}} \mod M)) \mod M) \gg 17) \mod 91
\end{aligned}$$

- Hemos separado $Ax_{1,U_{31}} + C$ y $Ax_{1,L_{17}}$

Random String Utils (2º Ataque)

- Los valores que hemos separado en la anterior diapositiva como máximo pueden ser *M - 1*
- Con esa premisa, tras sumar cada parte y hacer su módulo, al hacer otro módulo como mucho restaremos *M* o no se hará nada
- Aprovechándonos de eso, podemos reescribir la ecuación así:

$$y_2 = ((((Ax_{1,U_{31}} + C) \mod M) + (Ax_{1,L_{17}} \mod M) - b_2 M) \gg 17) \mod 91$$

- Donde $b_2 \in \{0, 1\}$

Random String Utils (2º Ataque)

- Ahora queremos separar $Ax_{1,U_{31}} + C$ y $Ax_{1,L_{17}}$ a través de la operación de desplazamiento a la derecha
- c es un término de corrección

$$(a+b) \gg n = (a \gg n) + (b \gg n) + c, \qquad c \in \{0,1\}$$

- Si tenemos en consideración que $M = 2^{48}$ y tenemos $b_2 2^{31} + c_2$

$$y_2 = ((((Ax_{1,U_{31}} + C) \mod M) \gg 17) + ((Ax_{1,L_{17}} \mod M) \gg 17) - b_2 2^{31} + c_2) \mod 91$$

Random String Utils (2º Ataque 1º Paso)

- Usando el primer output y_1 con la ecuación

$$y_1 = (x_1 \gg 17) \mod 91 \implies y_1 - 91k_1 = x_{1,U_{31}}$$

- Enumeramos todos los $\left[\frac{2^{31}}{91}\right]$ posibles valores de $k_1$para generar candidatos para $x_{1,U_{31}}$

Random String Utils (2º Ataque 2º Paso)

- Usando los candidatos de $x_{1,U_{31}}$ obtenidos del primer paso, calcular la parte de la izquierda

$$(y_2 - (((Ax_{1,U_{31}} + C) \mod M) \gg 17)) \mod 91$$

- Asociamos el valor candidato de $x_{1,U_{31}}$ con su valor que estará en [0-90]
- Nota: Cada valor entre [0-90] tendrá aproximadamente $2^{31}/91^2$ candidatos de $x_{1,U_{31}}$

Random String Utils (2º Ataque 3º Paso)

- Enumerar todos los posibles 2^{17} candidatos para $x_{1,L_{17}}$ y computar el valor de la parte de la derecha

$$(((Ax_{1,L_{17}} \mod M) \gg 17) - b_2 2^{31} + c_2) \mod 91$$

- Recordemos que:

$$b_2 \in \{0,1\} \qquad c_2 \in \{0,1\}$$

- Al igual que en la “parte izquierda”, el resultado serán valores entre 0 y 90
- En total hay $2^{17} \times 2 \times 2 = 2^{19}$ valores calculados

Random String Utils (2º Ataque 4º Paso)

- Para cada valor de la parte derecha que hemos calculado en el tercer paso, buscamos el valor adecuado de los valores calculados de la izquierda
- Aproximadamente tenemos una lista de $2^{31}/91^2$ candidatos para $x_{1,U_{31}}$ para buscar su “match” correcto en la lista de 2^{17} candidatos de $x_{1,L_{17}}$

- Este enfoque de ataque se llama *meet-in-the-middle*
- Básicamente es una compensación de tiempo de computación por memoria

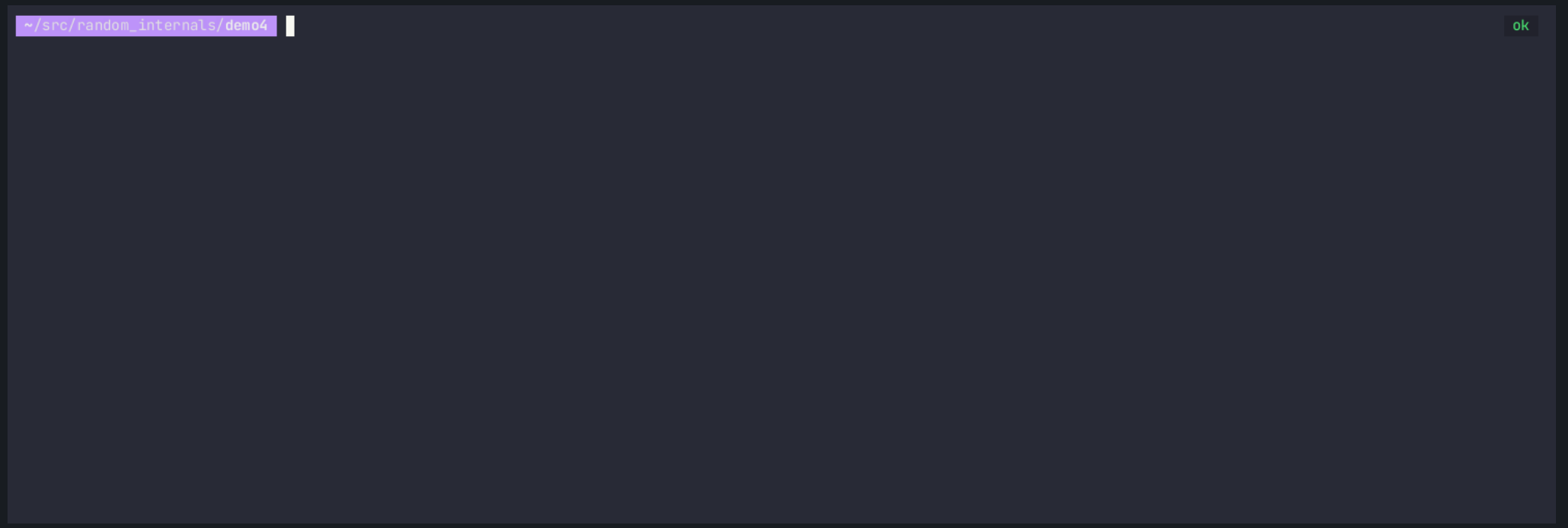
$$2^{19} \times 2^{31}/91^2 \approx 2^{37}$$

Random String Utils (2º Ataque EXTRA)

- Para el ataque anterior hemos utilizado y_1 y y_2
  - Recordemos que y_i es el output i de nextInt(91)
- Si incluyéramos también y_3 podríamos reducir la complejidad a:

$$2^{21} \times 2^{31} / 91^3 \approx 2^{32.5}$$

Ejemplo



SecureRandom()

- Funciona acumulando entropía de una fuente que son difícilmente observables

- */dev/urandom* y */dev/random* en Linux recogen información como interrupciones del hardware como discos duros buscando datos, presiones en el teclado, paquetes en red...
- El objetivo de SecureRandom() es producir números de forma no determinista usando distintas fuentes de datos
- Como contrapartida, es mucho más lenta que Random()

```
❯ hexdump -C -n 256 /dev/urandom
00000000  94 eb c8 0c 60 5b ed b7  f6 de e5 d9 4c 5c c8 6c  |....`[......L\.l|
00000010  f2 58 0c 45 45 2d 77 7d  b4 d7 d2 42 eb b8 99 2b  |.X.EE-w}...B...+|
00000020  93 2a a9 c4 3f 0a d6 82  a7 f4 3b 74 ff d6 e8 67  |.*..?.....;t...g|
00000030  a2 d8 2f 40 59 79 64 f9  27 04 66 72 1c 86 03 01  |../@Yyd.'.fr....|
00000040  9d 43 97 12 62 8f 5f 35  3e c8 81 1c 90 b6 17 95  |.C..b._5>.......|
00000050  23 75 ad e4 44 5a 29 44  b7 b5 8c db 38 09 36 6a  |#u..DZ)D....8.6j|
00000060  6c 1a e6 cf 67 03 c8 e3  f1 86 a7 d8 17 8a 1d a5  |l...g...........|
00000070  01 bc 4d 76 9f 4e 25 5c  3b 8b 52 28 d3 07 c1 ad  |..Mv.N%\;.R(....|
00000080  89 91 69 3f 00 2e f3 16  f5 c0 96 a2 c3 b6 7b ef  |..i?..........{.|
00000090  6c 99 7c f5 d0 9e b9 07  d3 11 b9 95 b2 2f cd d2  |l.|........../..|
000000a0  0e 88 a8 3f 30 0d 75 34  a8 ce bb 7e d9 f8 f2 72  |...?0.u4...~...r|
000000b0  20 2e fa 0a f5 f8 f5 1c  c0 81 f5 0b a4 d8 1c b2  | ...............|
000000c0  8f 34 be 31 7b a0 79 96  de 0b 02 f9 42 61 b1 5f  |.4.1{.y.....Ba._|
000000d0  05 4c 7d 5d bf 2c e8 2e  b4 bf 1b cf 90 fa eb ea  |.L}].,..........|
000000e0  40 2f 65 f8 5b 8f cd 23  6c ee 6d ab fc ad 18 b0  |@/e.[..#l.m.....|
000000f0  c5 99 dd 9f 4c 7f e2 da  a5 38 7e 4e 48 48 28 59  |....L....8~NHH(Y|
```

Resultados

2^{48}	$2^{40.5}$	$2^{32.5}$
130 horas (5 días)	1.5 horas	<1 minuto

Tiempo para conseguir la semilla en cada ataque explicado

Conclusiones

- El uso de java.util.Random y de RandomStringUtils no se debe usar en contextos de seguridad
- La implementación es un Sistema Congruente Lineal, que resulta en generación de números *pseudoalteatorios* de forma determinista
- Hay varios ataques que han conseguido decrementar drástricamente el tiempo necesario para extraer la semilla y predecir futuros outputs
- Happy Hunting!

Breaking Random() Internals For Fun!

Ismael Gómez Esquilichi