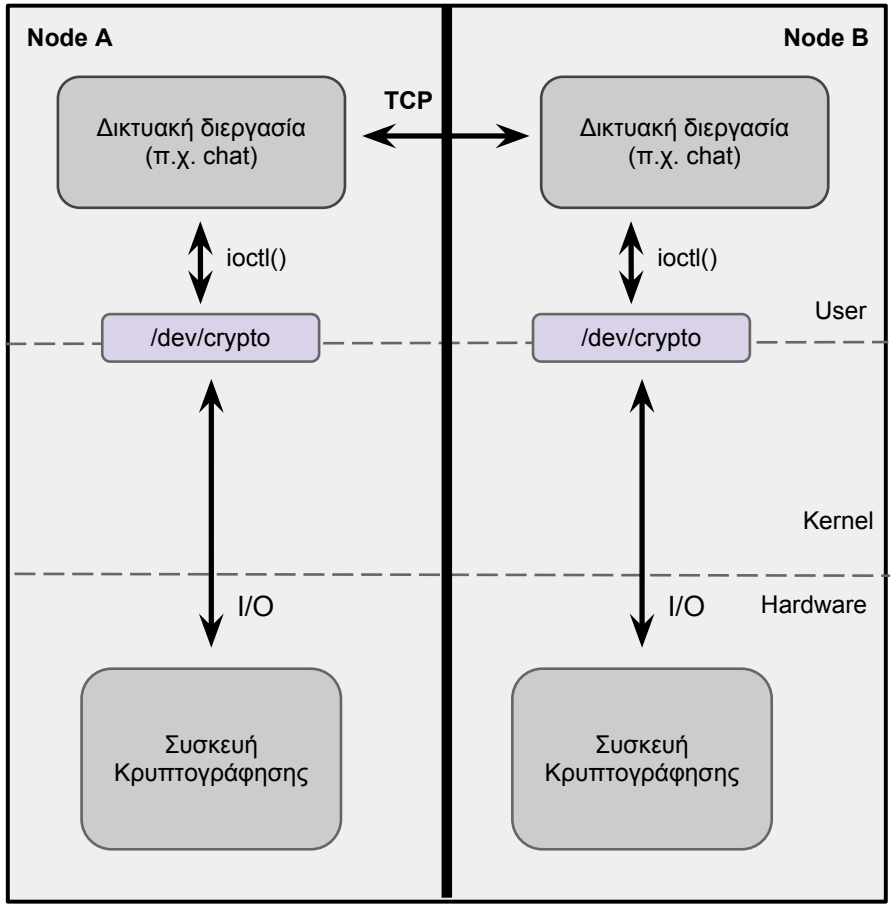
Κρυπτογραφική συσκευή VirtIO για QEMU-KVM

Εργαστήριο Λειτουργικών Συστημάτων
8ο εξάμηνο, ΣΗΜΜΥ

Εργαστήριο Υπολογιστικών Συστημάτων (CSLab)

Απρίλιος 2018

Βασικό Πλαίσιο



- Βασικό σενάριο άσκησης
- Πραγματικό / εικονικό περιβάλλον;

Άσκηση - Ζητούμενα

Άσκηση - Ζητούμενα

Z1: Εργαλείο chat πάνω από TCP/IP sockets

- Αμφίδρομη επικοινωνία πάνω από TCP/IP
- Με χρήση του BSD Sockets API

Άσκηση - Ζητούμενα

Ζ1: Εργαλείο chat πάνω από TCP/IP sockets

- Αμφίδρομη επικοινωνία πάνω από TCP/IP
- Με χρήση του BSD Sockets API

Ζ2: Κρυπτογραφημένο chat πάνω από TCP/IP

- Με χρήση του `cryptodev-linux` από userspace
- Κλήσεις συστήματος `ioctl()` στο `/dev/crypto`

Άσκηση - Ζητούμενα

Ζ1: Εργαλείο chat πάνω από TCP/IP sockets

- Αμφίδρομη επικοινωνία πάνω από TCP/IP
- Με χρήση του BSD Sockets API

Ζ2: Κρυπτογραφημένο chat πάνω από TCP/IP

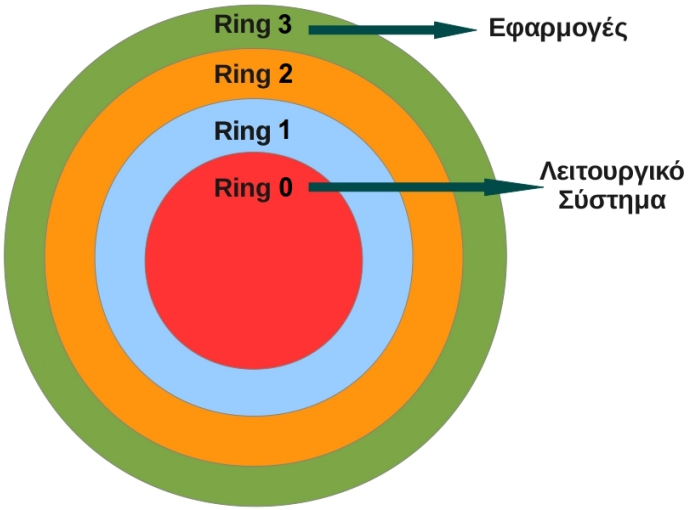
- Με χρήση του `cryptodev-linux` από userspace
- Κλήσεις συστήματος `ioctl()` στο `/dev/crypto`

Ζ3: Υλοποίηση συσκευής cryptodev με VirtIO

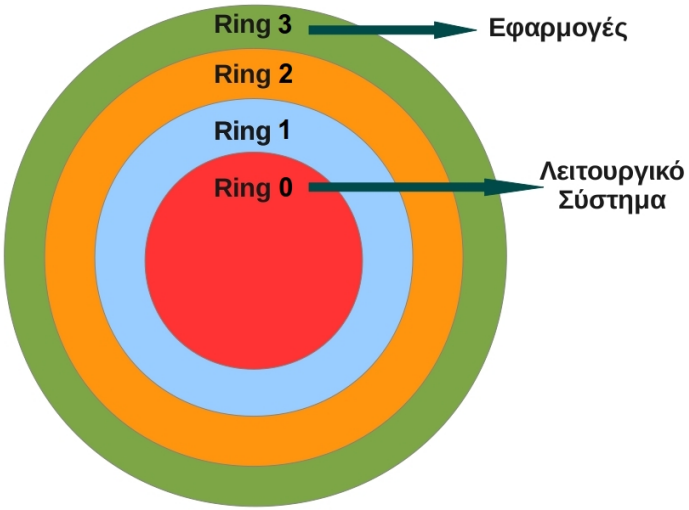
- Κρυπτογραφημένο chat μέσα σε VM
- με κλήσεις στο cryptodev του host
- Υλοποίηση οδηγού στο πλαίσιο VirtIO

ΛΣ και Privilege levels (Rings)

ΛΣ και Privilege levels (Rings)

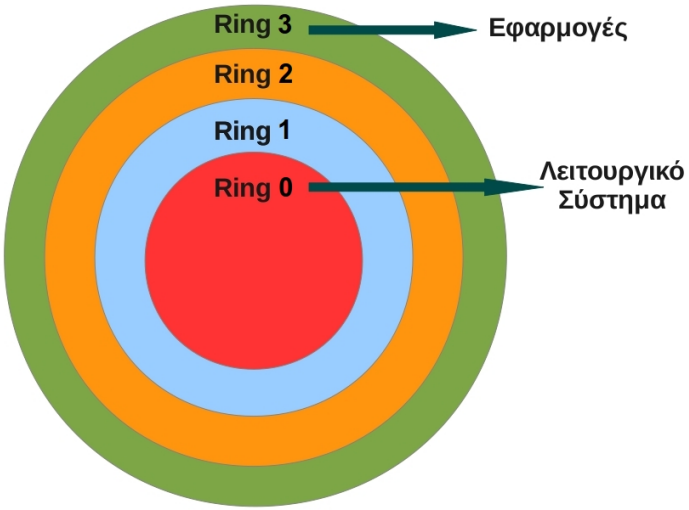


ΛΣ και Privilege levels (Rings)



- Μηχανισμός ιεραρχίας του υλικού για εξασφάλιση προστασίας/διαχωρισμού εφαρμογών
- Κάθε ring επιτρέπει συγκεκριμένες λειτουργίες
- Πιο προνομιακό το χαμηλότερο ring
- Π.χ. Linux σε x86: εφαρμογές(user-mode) –> Ring 3 , ΛΣ(kernel-mode) –> Ring 0

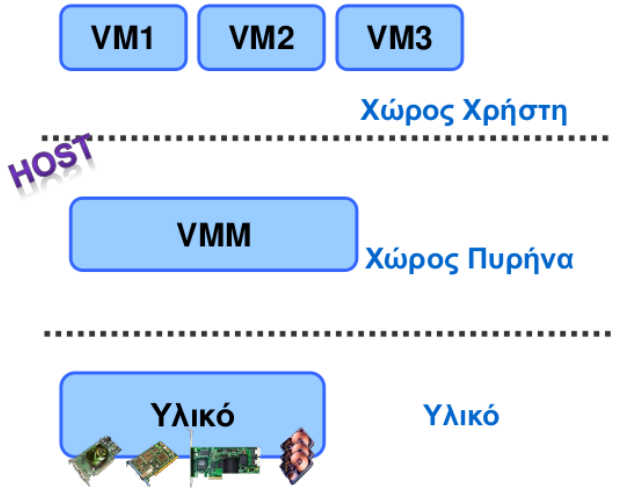
ΛΣ και Privilege levels (Rings)



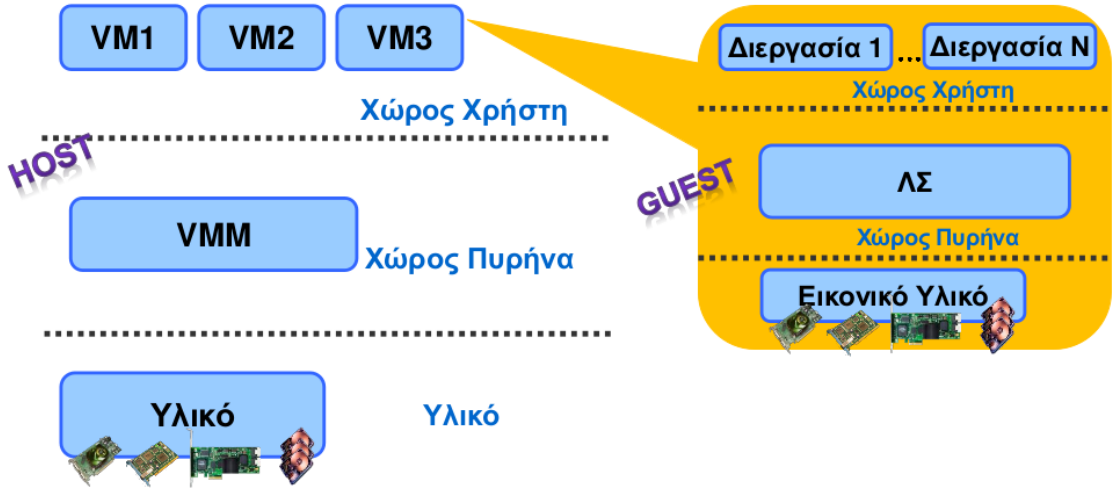
- Μη επιτρεπτές εντολές π.χ. στο Ring 3 προκαρούν *trap* που χειρίζεται το ΛΣ
- Παράδειγμα 1: διαίρεση με το μηδέν
- Παράδειγμα 2: πρόσβαση σε μη έγκυρη περιοχή μνήμης
- Παράδειγμα 3: κλήση συστήματος σε x86: `int $0x80` => trap (*software interrupt*) + μετάβαση σε χώρο πυρήνα

Οργάνωση ΛΣ (επανάλ.)

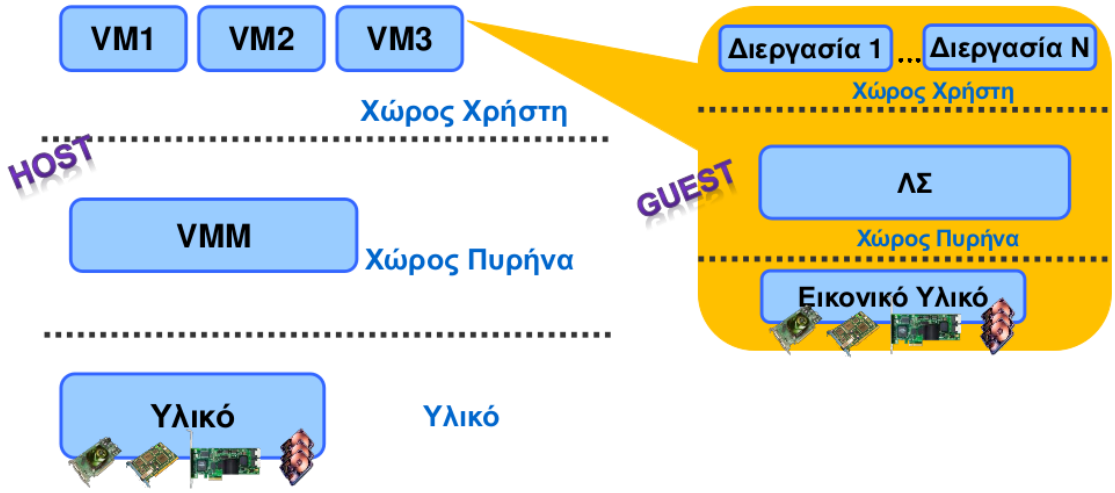
Εικονικοποίηση



Εικονικοποίηση



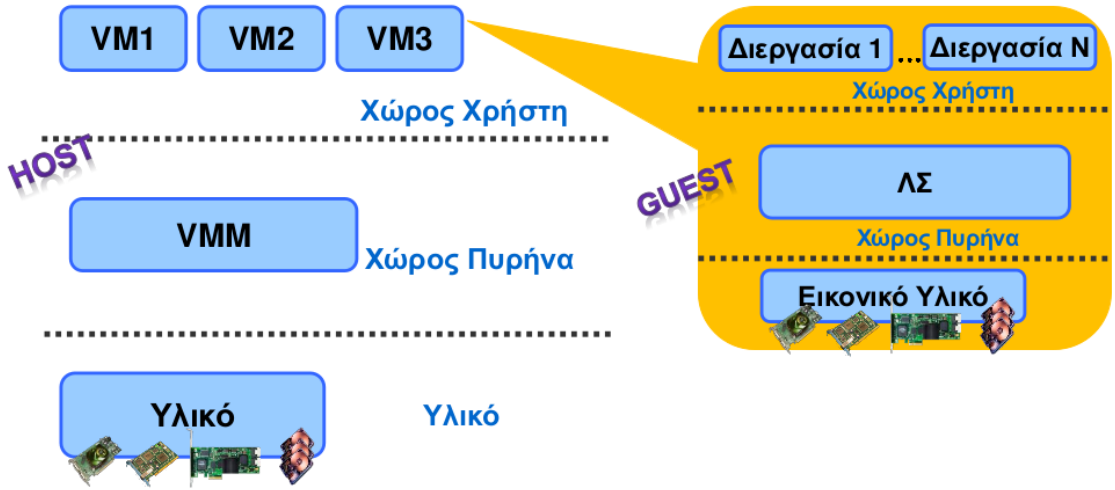
Εικονικοποίηση



Ορολογία

- VMM (Virtual Machine Monitor) ή *hypervisor*: δίνει την ψευδαίσθηση στα VMs ότι εκτελούνται σε φυσικό περιβάλλον
- **Host** –> ΛΣ διαχειρίζεται το φυσικό υλικό, **Guest** –> διαχειρίζεται το εικονικό υλικό
- Αναλογία: (φυσικό περιβάλλον) host ΛΣ - εφαρμογές => (εικονικό περιβάλλον) VMM - guest ΛΣ

Εικονικοποίηση



- 4 καταστάσεις:
  - Χώρος χρήστη guest
  - Χώρος πυρήνα guest
  - Χώρος χρήστη host
  - Χώρος πυρήνα host

Κατηγορίες Εντολών

- Προνομιούχες εντολές
  - Μπορούν να εκτελεστούν απευθείας μόνο αν η CPU βρίσκεται σε προνομιούχο κατάσταση (χώρο πυρήνα).
  - Αν η CPU βρίσκεται σε μη-προνομιούχο κατάσταση (χώρο χρήστη), προκαλείται **trap**, η CPU μεταβαίνει σε προνομιούχο κατάσταση και η εκτέλεση συνεχίζεται από προκαθορισμένη ρουτίνα χειρισμού στο ΛΣ ή στο VMM αντίστοιχα.

Κατηγορίες Εντολών

- Προνομιούχες εντολές
  - Μπορούν να εκτελεστούν απευθείας μόνο αν η CPU βρίσκεται σε προνομιούχο κατάσταση (χώρο πυρήνα).
  - Αν η CPU βρίσκεται σε μη-προνομιούχο κατάσταση (χώρο χρήστη), προκαλείται **trap**, η CPU μεταβαίνει σε προνομιούχο κατάσταση και η εκτέλεση συνεχίζεται από προκαθορισμένη ρουτίνα χειρισμού στο ΛΣ ή στο VMM αντίστοιχα.
- Μη-προνομιούχες εντολές
  - Μπορούν να εκτελεστούν απευθείας σε οποιαδήποτε κατάσταση βρίσκεται η CPU.

Κατηγορίες Εντολών

- Προνομιούχες εντολές
  - Μπορούν να εκτελεστούν απευθείας μόνο αν η CPU βρίσκεται σε προνομιούχο κατάσταση (χώρο πυρήνα).
  - Αν η CPU βρίσκεται σε μη-προνομιούχο κατάσταση (χώρο χρήστη), προκαλείται **trap**, η CPU μεταβαίνει σε προνομιούχο κατάσταση και η εκτέλεση συνεχίζεται από προκαθορισμένη ρουτίνα χειρισμού στο ΛΣ ή στο VMM αντίστοιχα.
- Μη-προνομιούχες εντολές
  - Μπορούν να εκτελεστούν απευθείας σε οποιαδήποτε κατάσταση βρίσκεται η CPU.
- Ευαίσθητες εντολές

Κατηγορίες Εντολών

- Ανάλογα με την αρχιτεκτονική του συστήματος, συγκεκριμένες ευαίσθητες εντολές μπορεί να παράγουν trap όταν εκτελούνται σε χώρο χρήστη και άρα να είναι και *προνομιούχες*.

- Επομένως, δεν είναι όλες οι ευαίσθητες εντολές προνομιούχες. Εξαρτάται από την αρχιτεκτονική.
  - Π.χ. η ***popf*** σε x86 εκτελείται χωρίς trap και σε χώρο χρήστη παράγοντας διαφορετικό αποτέλεσμα.

Κατηγοριοποίηση συστημάτων εικονικοποίησης

- Full virtualization
  - Μέθοδος trap & emulate
  - Μέθοδος binary translation
  - Hardware-assisted virtualization
- Paravirtualization
- Hybrid virtualization

Μέθοδος trap & emulate

- Η εικονική μηχανή εκτελείται στο χώρο χρήστη του host.
- Οι μη-προνομιούχες εντολές (διεργασιών ή πυρήνα) εκτελούνται απευθείας από τη CPU.
- Οι προνομιούχες εντολές προκαλούν trap.
  - Παρεμβαίνει ο VMM και προσομοιώνει τη συμπεριφορά της εντολής που θα ανέμενε η εικονική μηχανή.

Μέθοδος trap & emulate

- Η εικονική μηχανή εκτελείται στο χώρο χρήστη του host.
- Οι μη-προνομιούχες εντολές (διεργασιών ή πυρήνα) εκτελούνται απευθείας από τη CPU.
- Οι προνομιούχες εντολές προκαλούν trap.
  - Παρεμβαίνει ο VMM και προσομοιώνει τη συμπεριφορά της εντολής που θα ανέμενε η εικονική μηχανή.
- **Θεώρημα:** “Για να είναι δυνατή η εικονικοποίηση με τη μέθοδο trap & emulate, πρέπει το σύνολο των ευαίσθητων εντολών να είναι υποσύνολο των προνομιούχων εντολών”.

Popek, G. J., Goldberg, R. P. (July 1974). ”Formal requirements for virtualizable third generation architectures”.

Μέθοδος binary translation

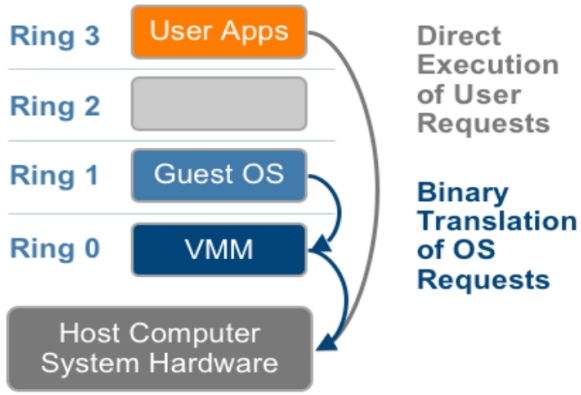
- Πρέπει ο VMM να είναι σε θέση να “πιάσει” ευαίσθητες εντολές που εκτελούνται σε guest χώρο πυρήνα (άρα σε host χώρο χρήστη).

- Αν αυτές δεν προκαλούν trap στο χώρο χρήστη;

Μέθοδος binary translation

- Πρέπει ο VMM να είναι σε θέση να “πιάσει” ευαίσθητες εντολές που εκτελούνται σε guest χώρο πυρήνα (άρα σε host χώρο χρήστη).
- Αν αυτές δεν προκαλούν trap στο χώρο χρήστη;
- Λύση:
  - Οι εντολές στο guest χώρο χρήστη εκτελούνται απευθείας στη CPU.
  - Ο VMM διαβάζει τις εντολές στο guest χώρο πύρηνα και τις μεταφράζει (στατικά ή δυναμικά) με άλλες που προσομοιώνουν την αντίστοιχη λειτουργία.

Μέθοδος binary translation



Πλεονεκτήματα

- Δεν υπάρχει επιπλέον κόστος εκτέλεσης των μη-προνομιούχων εντολών.
- Εύκολη δημιουργία/διαχείριση εικονικών μηχανών (ίδιο image πυρήνα με αυτό του φυσικού μηχανήματος).
- Δεν απαιτούνται αλλαγές στο υλικό

Μειονεκτήματα

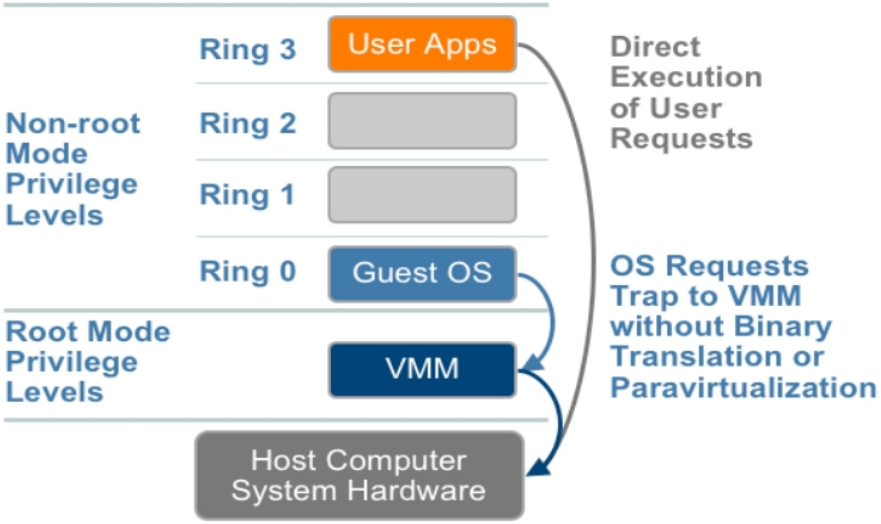
- Μεγάλο κόστος εκτέλεσης των προνομιούχων εντολών

Πηγή εικόνας: http://www.vmware.com/files/pdf/VMware_paravirtualization.pdf

Hardware-assisted virtualization

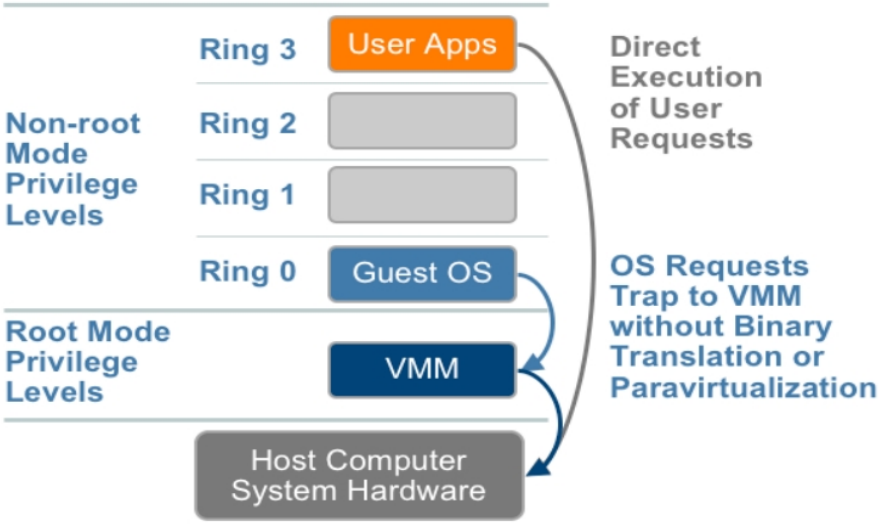
- Αλλαγές στο υλικό, προκειμένου η CPU να “αναγνωρίζει” και τις 4 καταστάσεις guest/host.
  - Πώς $\rightarrow$ Ring -1.
- Έτσι, οι αντίστοιχες ευαίσθητες εντολές προκαλούν πάντα trap όταν εκτελούνται σε guest χώρο πυρήνα και παρεμβαίνει ο VMM.

Hardware-assisted virtualization



Πηγή εικόνας: http://www.vmware.com/files/pdf/VMware_paravirtualization.pdf

Hardware-assisted virtualization



Πλεονεκτήματα

- Εύκολη δημιουργία/διαχείριση εικονικών μηχανών
- Καλύτερη επίδοση (λόγω υποστήριξης από το υλικό)

Μειονεκτήματα

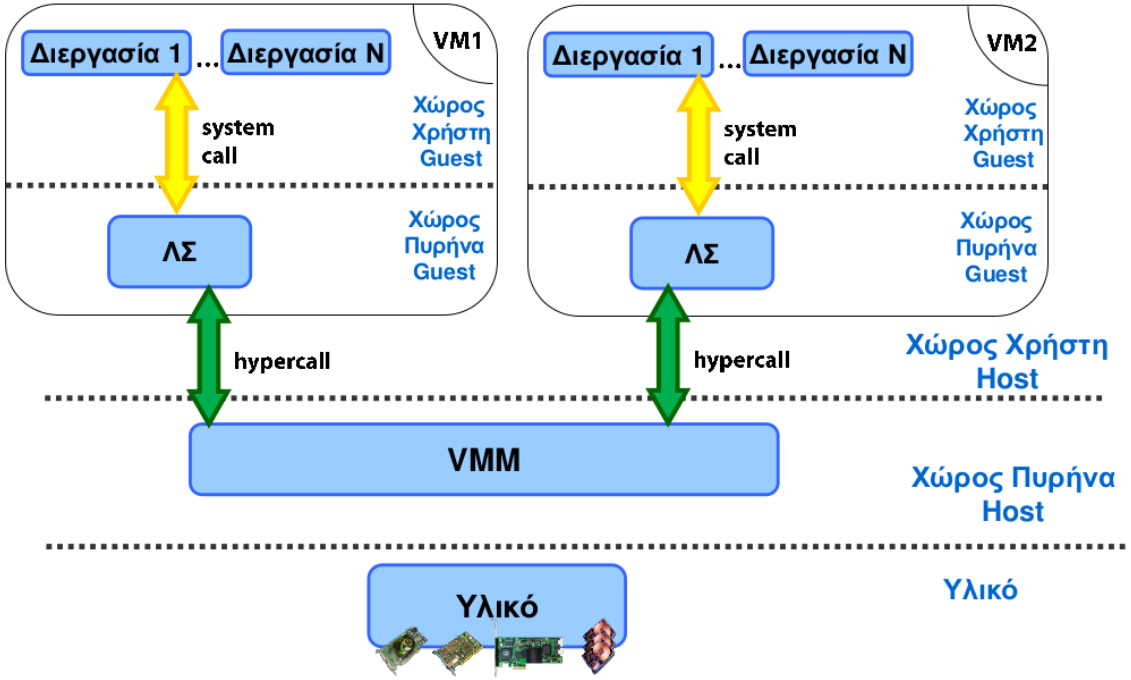
- Δε βελτιώνεται η επίδοση σε I/O

Πηγή εικόνας: http://www.vmware.com/files/pdf/VMware_paravirtualization.pdf

Paravirtualization

- Απαιτούνται αλλαγές σε κομμάτια (συνήθως drivers) του πυρήνα ενός φυσικού μηχανήματος για να χρησιμοποιηθούν από ένα εικονικό μηχάνημα
- Αυτοί οι paravirtualized drivers “γνωρίζουν” ότι τρέχουν σε εικονικό περιβάλλον
- Έχοντας αυτή τη γνώση, πραγματοποιούν αιτήματα με αποδοτικότερο τρόπο στον hypervisor (hypercalls - αναλογία με system calls).

Paravirtualization



Πλεονεκτήματα

- Συνήθως καλύτερη επίδοση (ειδικά στο I/O)

Μειονεκτήματα

- Ειδικές αλλαγές στον κώδικα του ΛΣ μέσα στο VM

Hybrid virtualization

- Συνδυασμός hardware-assisted virtualization + paravirtualization
- Άθικτος κώδικας του μεγαλύτερου μέρους του πυρήνα + αλλαγές στους drivers για γρηγορότερο I/O

Hybrid virtualization

- Συνδυασμός hardware-assisted virtualization + paravirtualization
- Άθικτος κώδικας του μεγαλύτερου μέρους του πυρήνα + αλλαγές στους drivers για γρηγορότερο I/O

Πλεονεκτήματα

- Γενικά καλύτερη επίδοση (και) στο I/O

Μειονεκτήματα

- Αλλαγές στους drivers του VM

Πλατφόρμα εικονικοποίησης KVM

KVM (Kernel Virtual Machine)

- Hypervisor για Linux σε x86
- Hardware-assisted virtualization επιλογή
- Εκμεταλλεύεται τα virtualization extensions στο υλικό (Intel VT-x, AMD-V)
- Εντάσσεται σε υπάρχον σύστημα εξομοίωσης υλικού, συνήθως το QEMU

QEMU Emulator

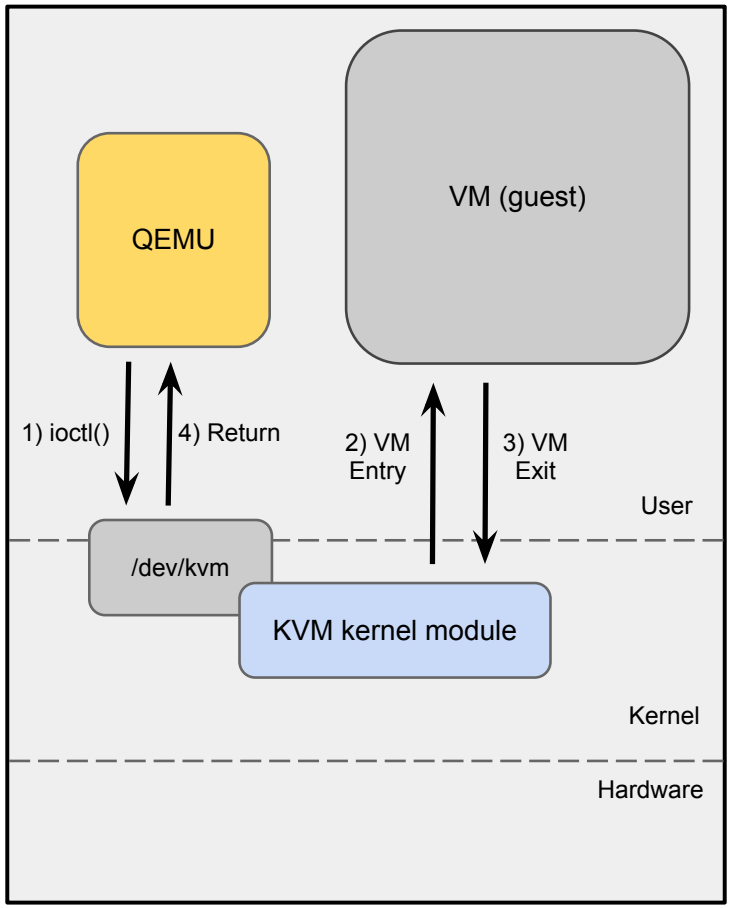
QEMU

- Εξομοιώνει τη λειτουργία του υλικού
- Υλοποίηση υλικού σε λογισμικό (δίσκοι, κάρτες δικτύου, θύρες)
- Μπορεί να εκτελεστεί σε διάφορα modes (CPU emulation, system virtualization κλπ)
- Διεργασία χώρου χρήστη

VirtIO

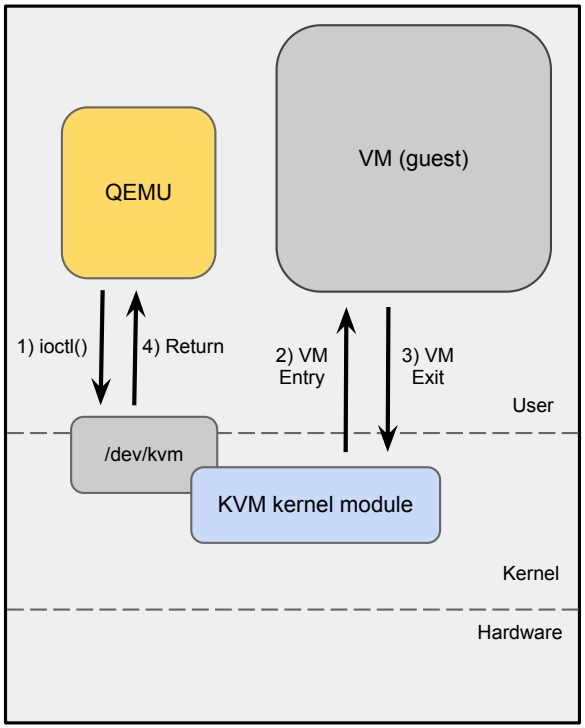
- Είναι ένα πρότυπο για εικονικοποίηση συσκευών Ε/Ε
- Αποτελεί **paravirtualized** επιλογή
- Split-driver μοντέλο: **1)** frontend (guest kernel) - **2)** backend (qemu userspace) drivers
- Κυκλικοί buffers για επικοινωνία μεταξύ frontend/backend
- Αντί για εντολές I/O (πχ `IN`, `OUT`), εγγραφή σε αντίστοιχη θέση μνήμης ενός buffer $\rightarrow$ doorbell
- **Υπάρχουσες υλοποιήσεις**: `virtio_net`, `virtio_blk`, `virtio_console`
- hybrid: **KVM** + **VirtIO** = full virtualization με paravirtualized I/O

KVM - QEMU (1)



- Kernelspace driver: υποστηρίζει συσκευή χαρακτήρων `/dev/kvm`
- Η διεργασία QEMU εκτελεί `ioctl()`s στο `/dev/kvm` (1)
- Δημιουργείται το VM και το module κάνει VM Entry (2)

KVM - QEMU (2)



- Οι μη-προνομιούχες εντολές του guest εκτελούνται απευθείας στον επεξεργαστή
- Οι προνομιούχες εντολές (π.χ. I/O) προκαλούν αρχικά trap (VM Exit (3)) και περνάνε στη διεργασία του QEMU(4)
- Το QEMU εξυπηρετεί την εντολή I/O, αν χρειαστεί με κλήση συστήματος

Κρυπτογραφία και υλοποιήσεις

Software

- Από τον προγραμματιστή
  - Απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις και δεν είναι πρακτικό
- Μέσω βιβλιοθήκης υψηλού επιπέδου
  - Ο συνήθης τρόπος (π.χ. OpenSSL), αλλά...
  - οι υλοποιήσεις σε λογισμικό είναι αργές

Hardware

- Ήδη διαθέσιμο σε πολλές οικογένειες επεξεργαστών/boards (ακόμα και οικιακές, π.χ. AES σε Intel i7 Westmere)
- Πολύ ταχύτερο, αλλά μπορεί να απαιτεί ειδικούς drivers.

Cryptodev

- Kernel driver που υποστηρίζει εξειδικευμένους επιταχυντές σε υλικό. Αρχική υλοποίηση: OpenBSD cryptodev API.
- Πραγματοποιεί εξομοίωση σε χώρο πυρήνα για μηχανήματα που δεν διαθέτουν hardware accelerator.
- Υποστηρίζεται από την OpenSSL (ως engine).
- Εξάγει το αρχείο συσκευής χαρακτήρων `/dev/crypto`

Χρήση cryptodev API

- Τέσσερις κλήσεις `ioctl()` προς τη συσκευή μας δίνουν όλες τις δυνατότητες!

Παράδειγμα

```
fd = open(”/dev/crypto”);
ioctl(fd, CIOCGSESSION); /* get session */
crypt.src = clr; crypt.dst = enc; crypt.op = COP_ENCRYPT;
ioctl(fd, CIOCRYPT, &crypt); /* encrypt data */
crypt.dst = clr; crypt.src = enc; crypt.op = COP_DECRYPT;
ioctl(fd, CIOCRYPT, &crypt); /* decrypt data */
ioctl(fd, CIOCFSESSION); /* close session */
close(fd);
```

Τι μπορούμε να κάνουμε μαζί με TCP/IP sockets;

- Encrypted chat :)

Άσκηση

Z1, Z2: Κρυπτογραφημένο chat πάνω από TCP/IP

- Command line εργαλείο για μεταφορά μηνυμάτων πάνω από TCP/IP sockets
- Επέκτασή του ώστε να χρησιμοποιεί το cryptodev-linux
- Σας δίνονται παραδείγματα χρήσης των sockets και του cryptodev

Άσκηση

Z1, Z2: Κρυπτογραφημένο chat πάνω από TCP/IP

- Command line εργαλείο για μεταφορά μηνυμάτων πάνω από TCP/IP sockets
- Επέκτασή του ώστε να χρησιμοποιεί το cryptodev-linux
- Σας δίνονται παραδείγματα χρήσης των sockets και του cryptodev

Έλεγχος για ύπαρξη κρυπτογραφημένων μηνυμάτων

```
#tcpdump -vvv -ni eth0 ...
```

Άσκηση

Z1, Z2: Κρυπτογραφημένο chat πάνω από TCP/IP

- Command line εργαλείο για μεταφορά μηνυμάτων πάνω από TCP/IP sockets
- Επέκτασή του ώστε να χρησιμοποιεί το cryptodev-linux
- Σας δίνονται παραδείγματα χρήσης των sockets και του cryptodev

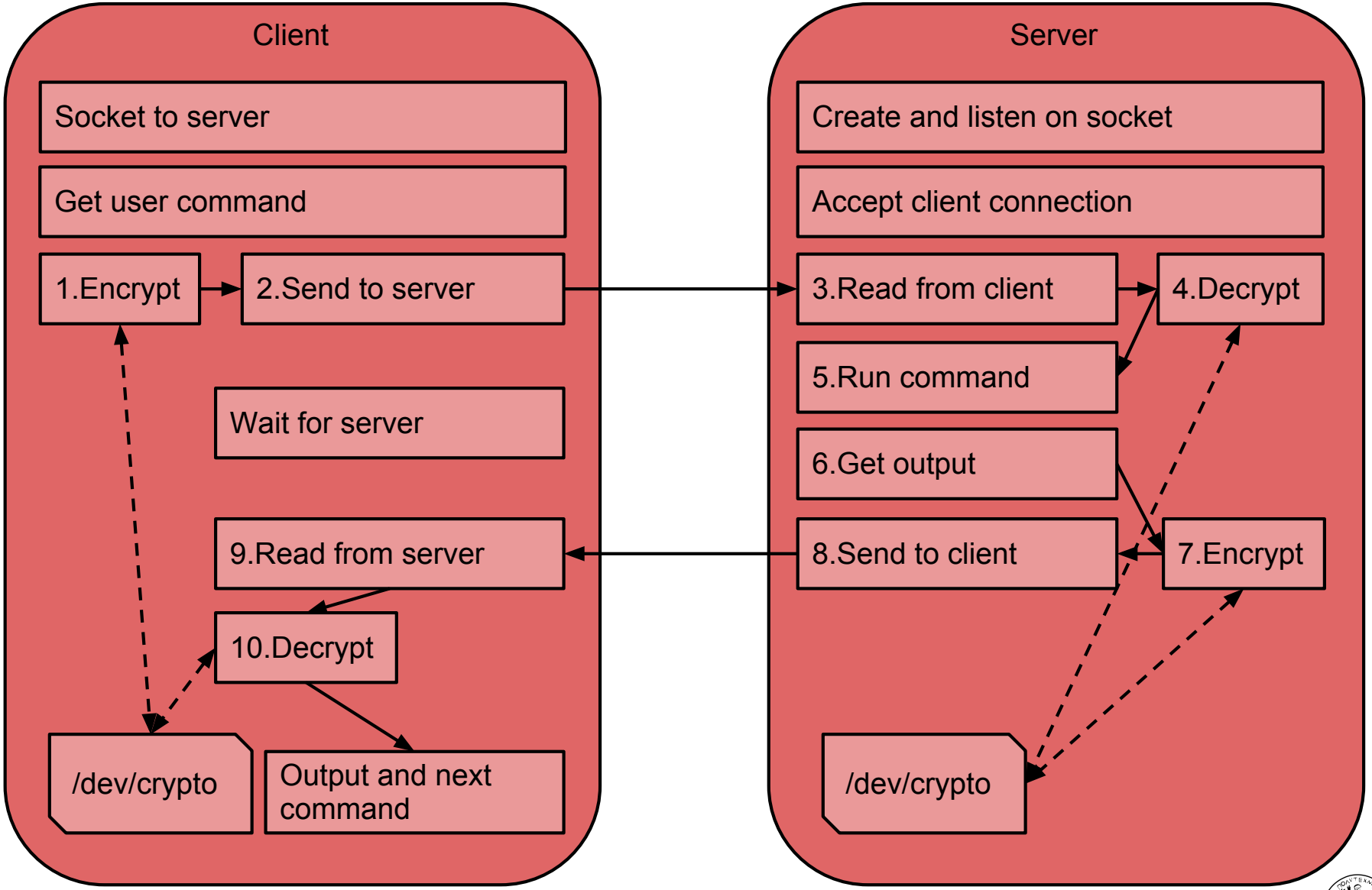
Έλεγχος για ύπαρξη κρυπτογραφημένων μηνυμάτων

```
#tcpdump -vvv -ni eth0 ...
```

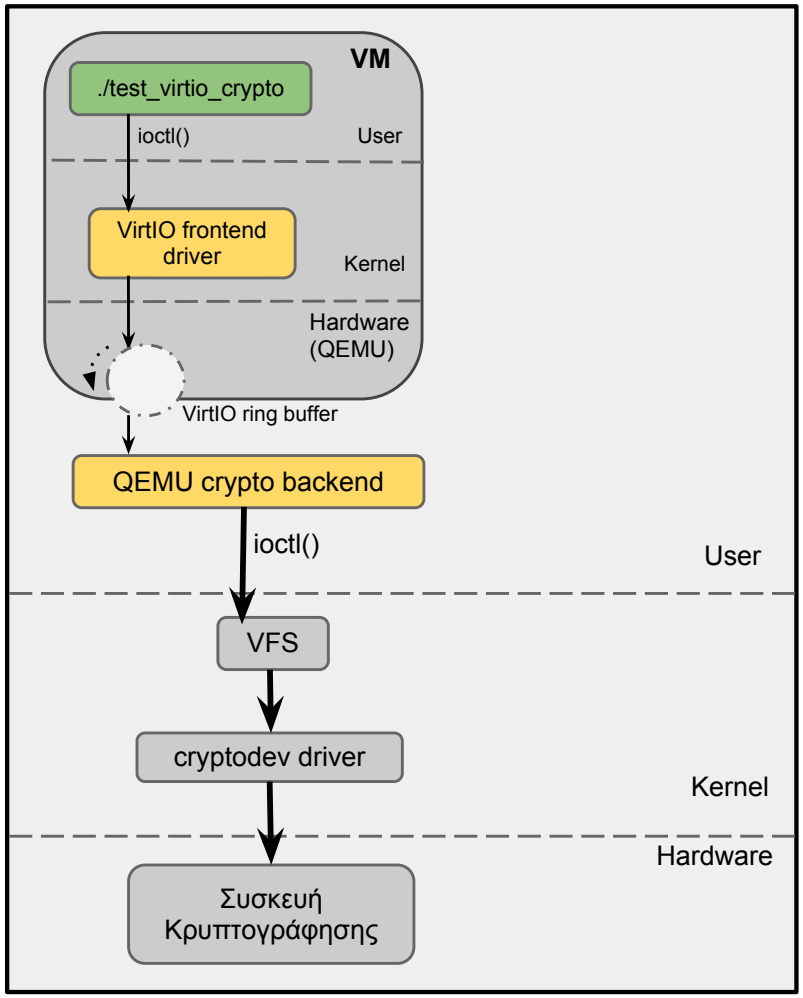
Προαιρετικά

- Πολλοί clients ταυτόχρονα (IRC!)

Παράδειγμα χρήσης cryptodev



Ζ3: Υλοποίηση συσκευής cryptodev με VirtIO



- Υλοποίηση frontend+backend **virtio_crypto** driver
- Εκτέλεση εργαλείου chat με TCP/IP πάνω από αυτό

Αναφορές

- A. Kivity, Y. Kamay, D. Laor, U. Lublin, and A. Liquori. kvm: the linux virtual machine monitor. In Linux Symposium, pages 225-230, Ottawa, Ontario, Canada, 2007.
- F. Bellard. Qemu, a fast and portable dynamic translator. In ATEC ’05 Proceedings of the annual conference on USENIX Annual Technical Conference, 2005.
- R. Russel. virtio: Towards a de-facto standard for virtual i/o devices. In ACM SIGOPS Operating Systems, 2008.
- Qumranet. Kernel-based Virtualization Driver (White Paper), 2006.
- Yasunori Goto. The kernel-based virtual machine Technology. Fujitsu Global Book, 2011.

Ερωτήσεις;

Λίστα μαθήματος:
os-lab@lists.cslab.ece.ntua.gr