



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ. και Μηχανικών Υπολογιστών
Εργαστήριο Υπολογιστικών Συστημάτων

Οδηγός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων στο Λειτουργικό Σύστημα Linux

Εργαστήριο Λειτουργικών Συστημάτων
2η εργαστηριακή άσκηση

Οκτώβριος 2022



Οργάνωση ενός σύγχρονου Λ.Σ.

Διεργασία1 Διεργασία2 Διεργασία3

◆ Χώρος χρήστη

- ➔ απομονωμένη εκτέλεση
- ➔ χρήση κλήσεων συστήματος

Υπηρεσίες του πυρήνα

Οδηγοί συσκευών

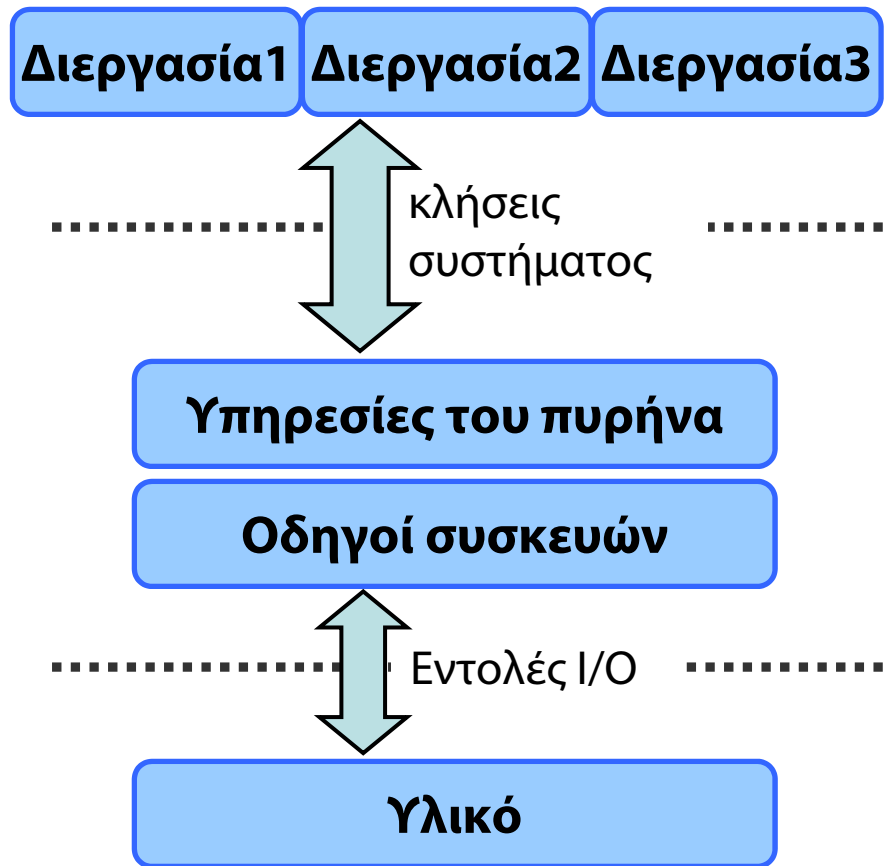
Εντολές I/O

Υλικό

◆ Χώρος πυρήνα

- ➔ απεριόριστη πρόσβαση στη μνήμη
- ➔ ελεύθερη επικοινωνία με το υλικό

Οργάνωση ενός σύγχρονου Λ.Σ.



◆ Χώρος χρήστη

- ➔ απομονωμένη εκτέλεση
- ➔ χρήση κλήσεων συστήματος

◆ Χώρος πυρήνα

- ➔ απεριόριστη πρόσβαση στη μνήμη
- ➔ ελεύθερη επικοινωνία με το υλικό

Ο πυρήνας του Linux



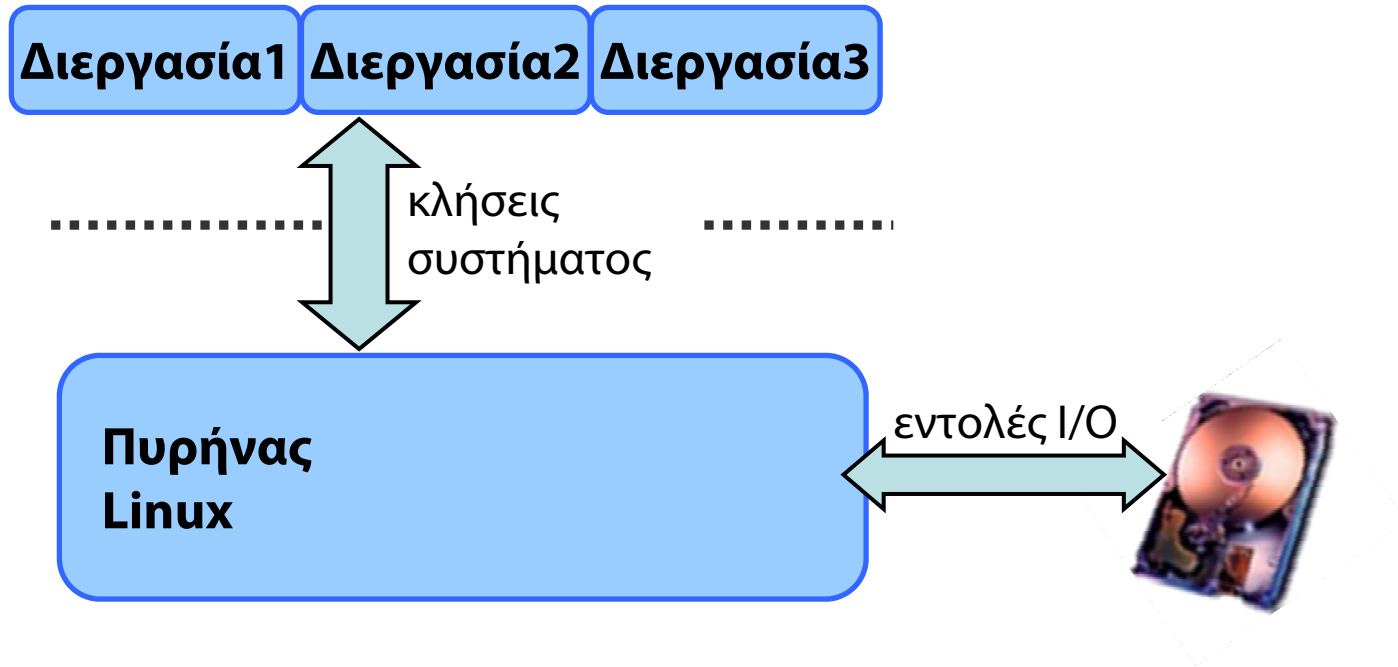
- ◆ Διαχείριση διεργασιών
 - ➔ χρονοδρομολόγηση σε CPUs
- ◆ Διαχείριση μνήμης
- ◆ Διαδικτύωση (TCP/IP)
- ◆ Υποστήριξη συστημάτων αρχείων
- ◆ Διαχείριση συσκευών (Device Drivers)

Kernel modules

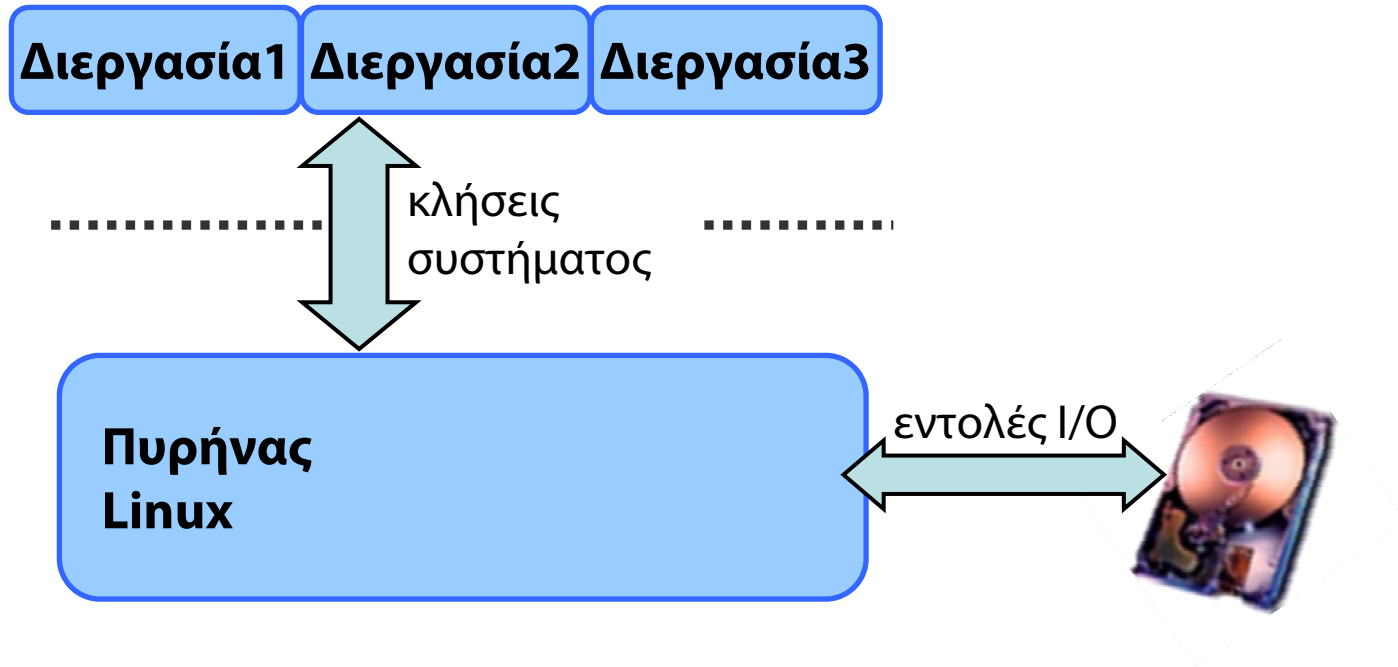


- ◆ Τμήματα κώδικα
- ◆ Επέκταση των δυνατοτήτων του πυρήνα
 - ➔ Οδηγοί συσκευής, συστήματα αρχείων
- ◆ Δυναμική εισαγωγή / αφαίρεση
 - ➔ Ενώ ο πυρήνας εκτελείται
 - ➔ Απαιτούνται δικαιώματα root
- ◆ Εκτέλεση σε kernelspace

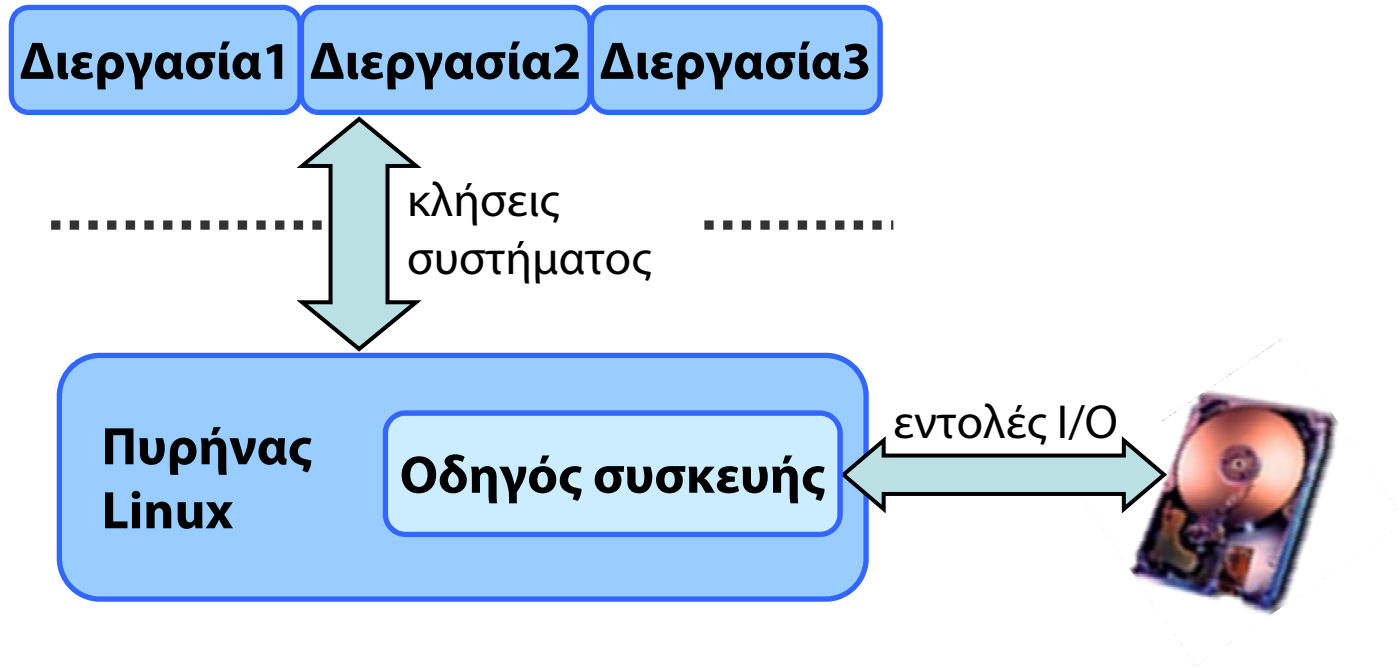
Οδηγοί συσκευής



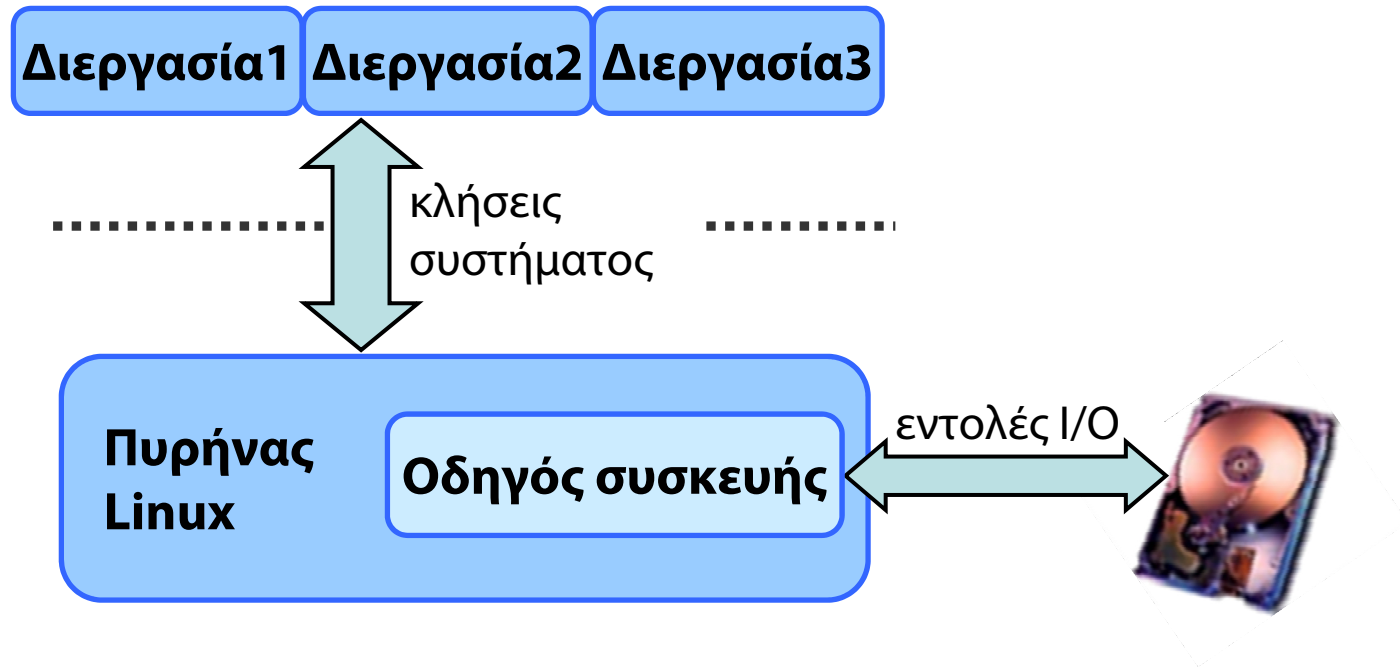
Οδηγοί συσκευής



Οδηγοί συσκευής

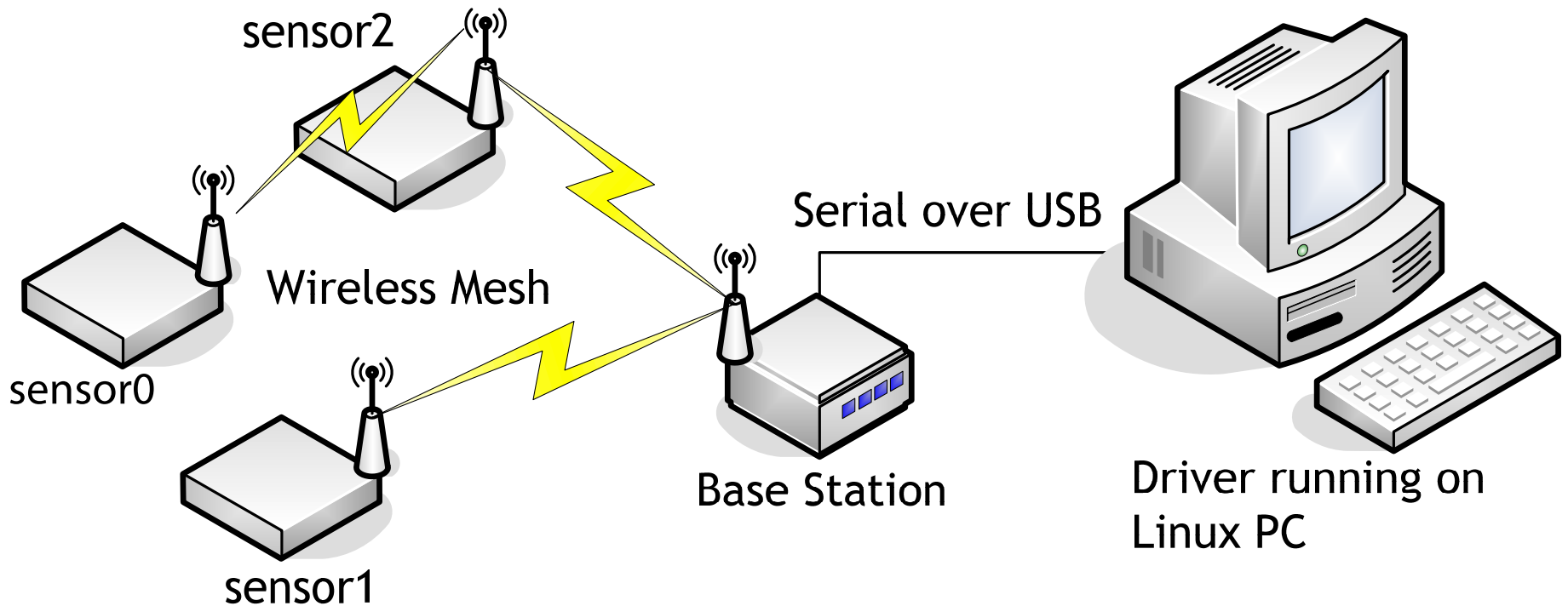


Οδηγοί συσκευής

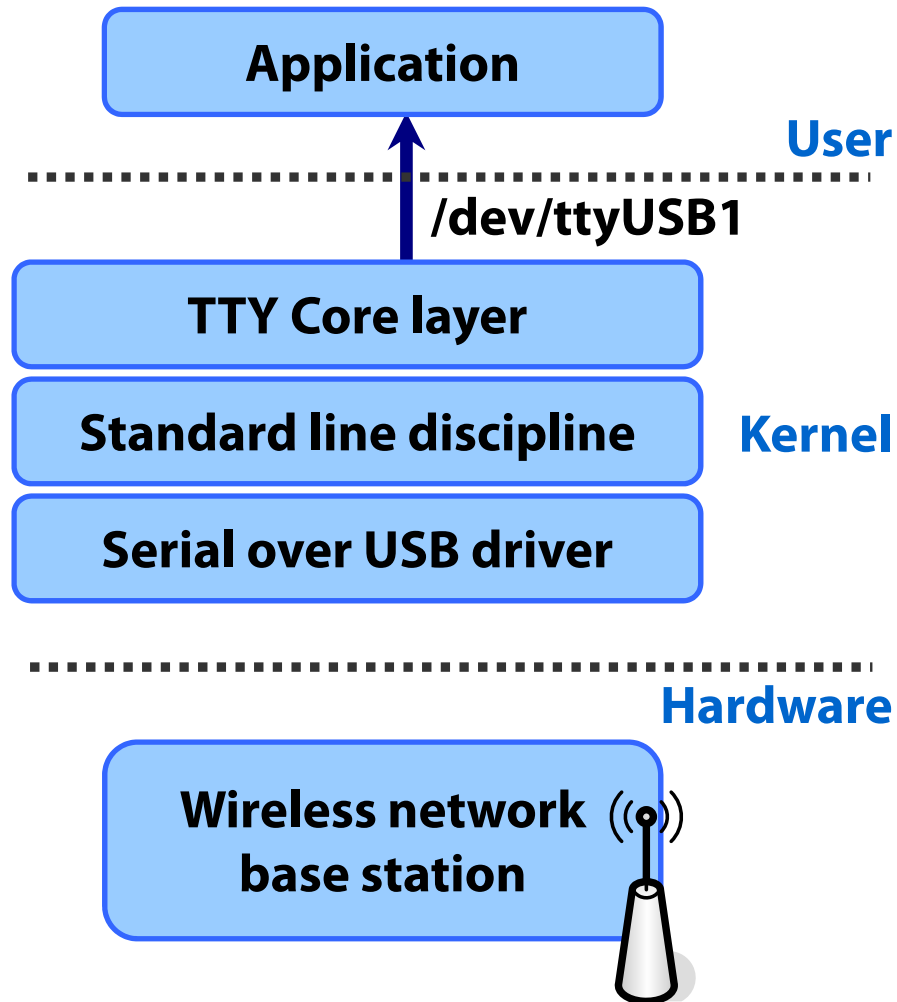


- ◆ Απόκρυψη των λεπτομερειών
- ◆ Καθορισμένο interface με τον πυρήνα
- ◆ Δυνατότητα δυναμικής εισαγωγής ως module
- ◆ Εφαρμογές ανεξάρτητες από το hardware

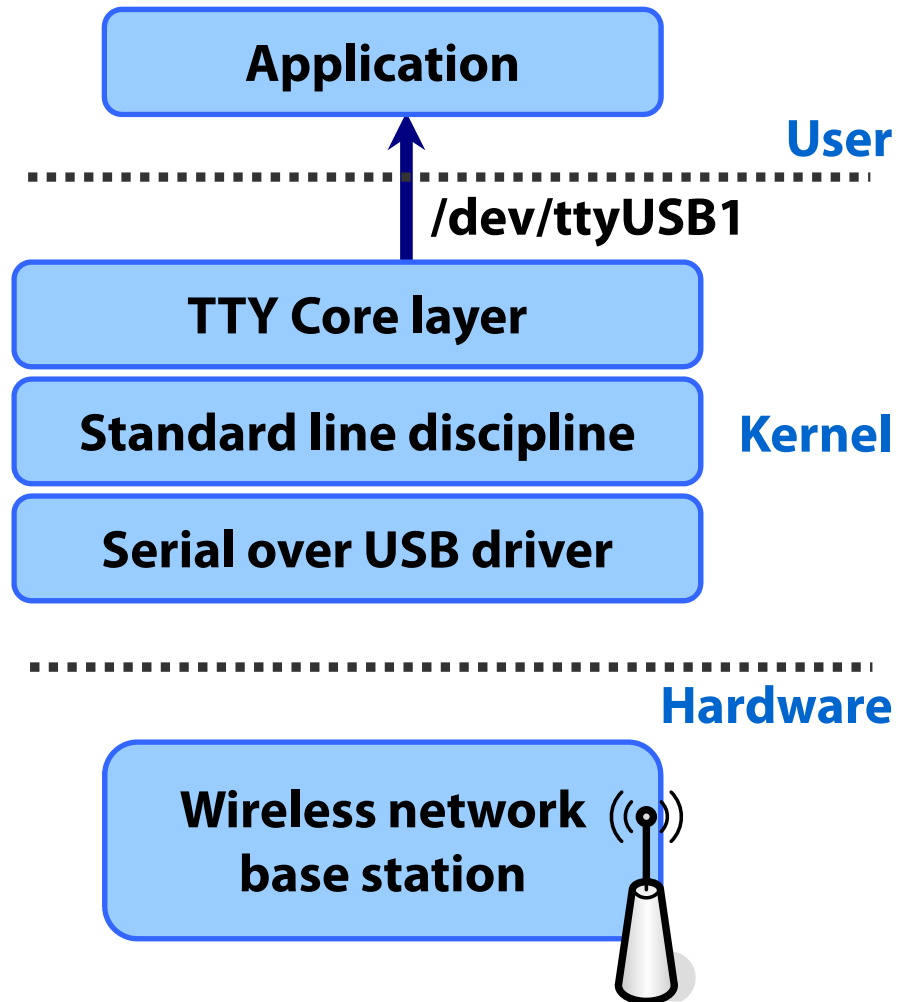
Driver για ένα πραγματικό σύστημα



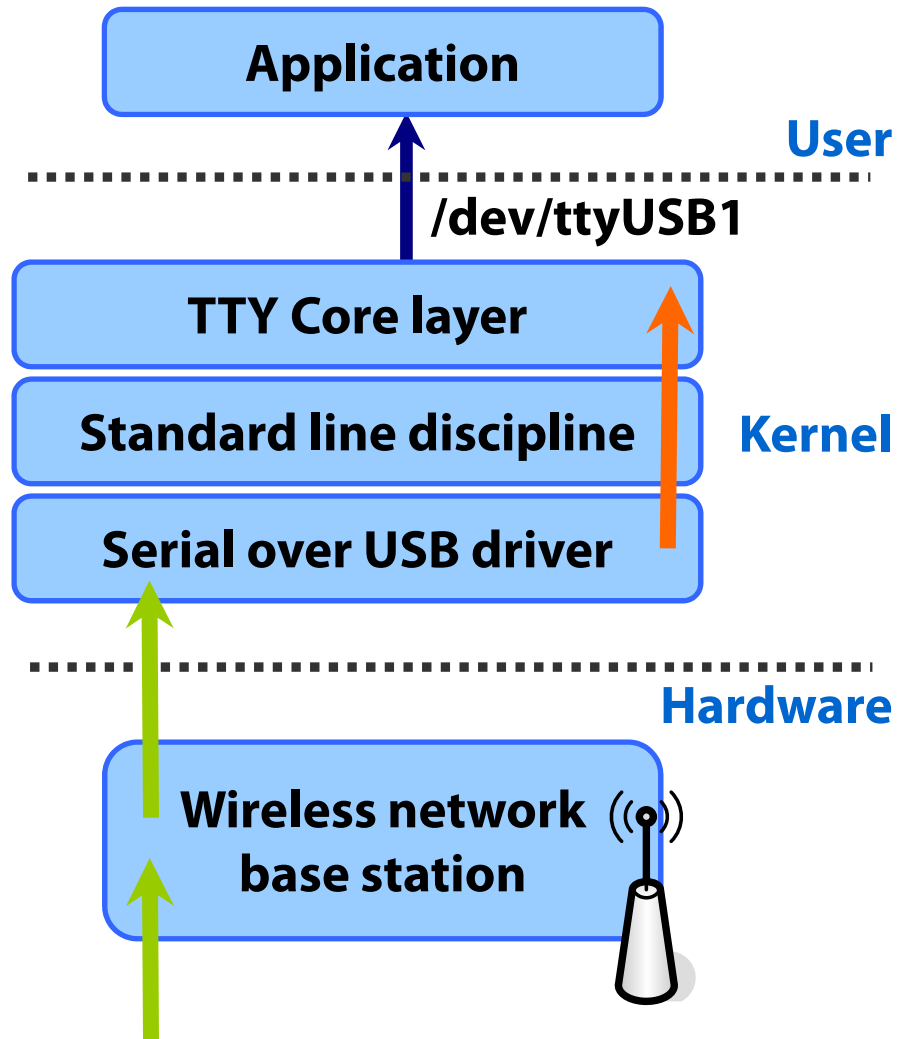
Μα υπάρχει ήδη driver!



Μα υπάρχει ήδη driver!



Μα υπάρχει ήδη driver!



Ναι, αλλά...



- ◆ Όλα τα πακέτα δεδομένων, χωρίς διάκριση, στο `/dev/ttyUSB1`
- ◆ Για μόνο μία διεργασία
- ◆ Δεν υπάρχει μηχανισμός για λεπτομερή ανάθεση δικαιωμάτων πρόσβασης
 - ➔ ανά χρήστη, ανά αισθητήρα, ανά μέτρηση
 - ➔ ανάγκη για διακριτή αντιμετώπιση

Οπότε...

◆ Lunix:TNG

- ➔ driver για τον πυρήνα του Linux
- ➔ Χωριστό αρχείο συσκευής ανά αισθητήρα και μέτρηση
 - /dev/lunix0-{batt, temp, light}
 - /dev/lunix1-{batt, temp, light}
- ➔ Ταυτόχρονη πρόσβαση από πολλές διεργασίες
- ➔ Περιορισμός δικαιωμάτων ανά αρχείο

Υπό κατασκευή σύστημα

Application

/dev/ttyUSB1



TTY Core layer

**Standard
line disc.**

Serial over USB driver

User

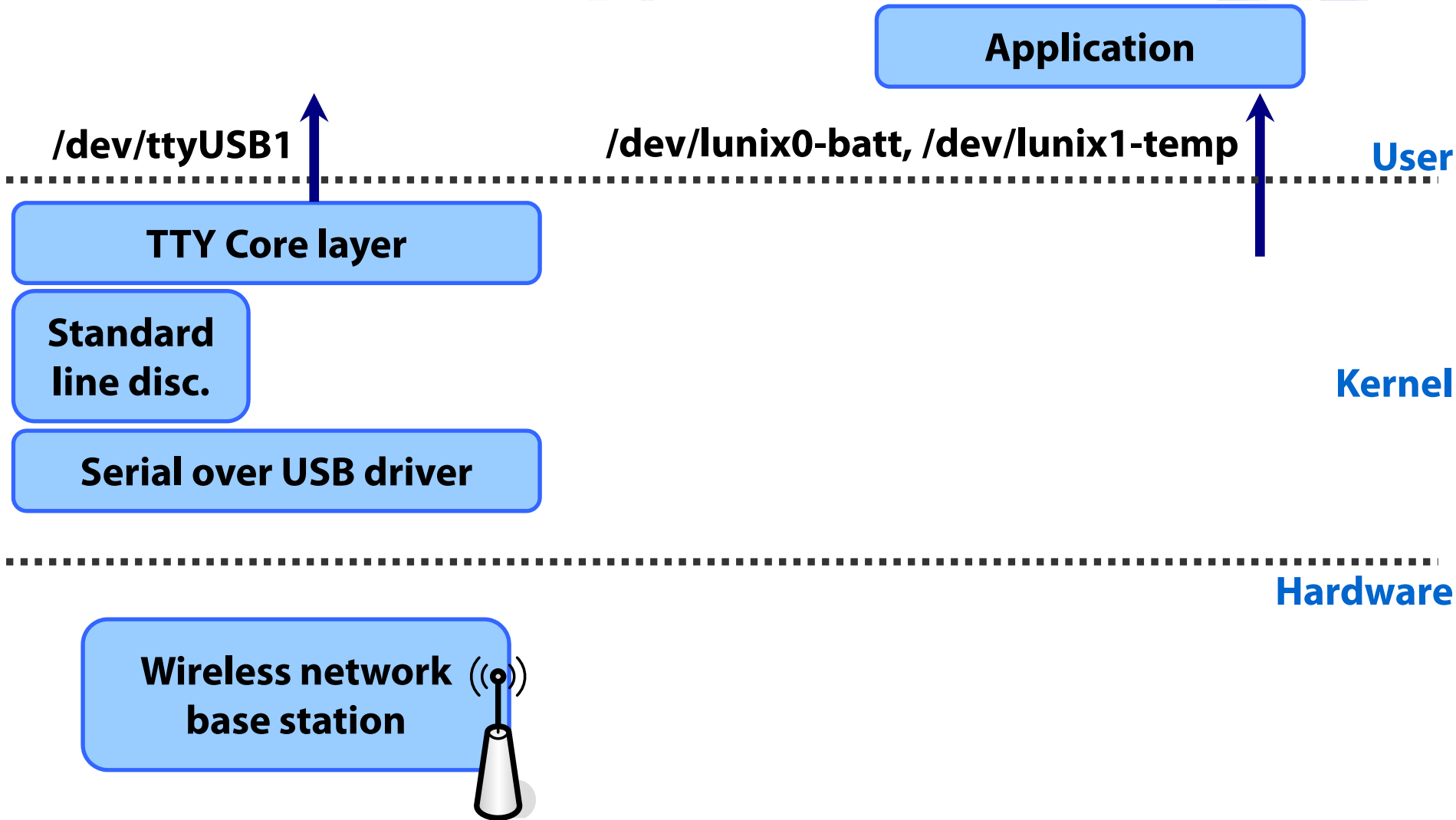
Kernel

Hardware

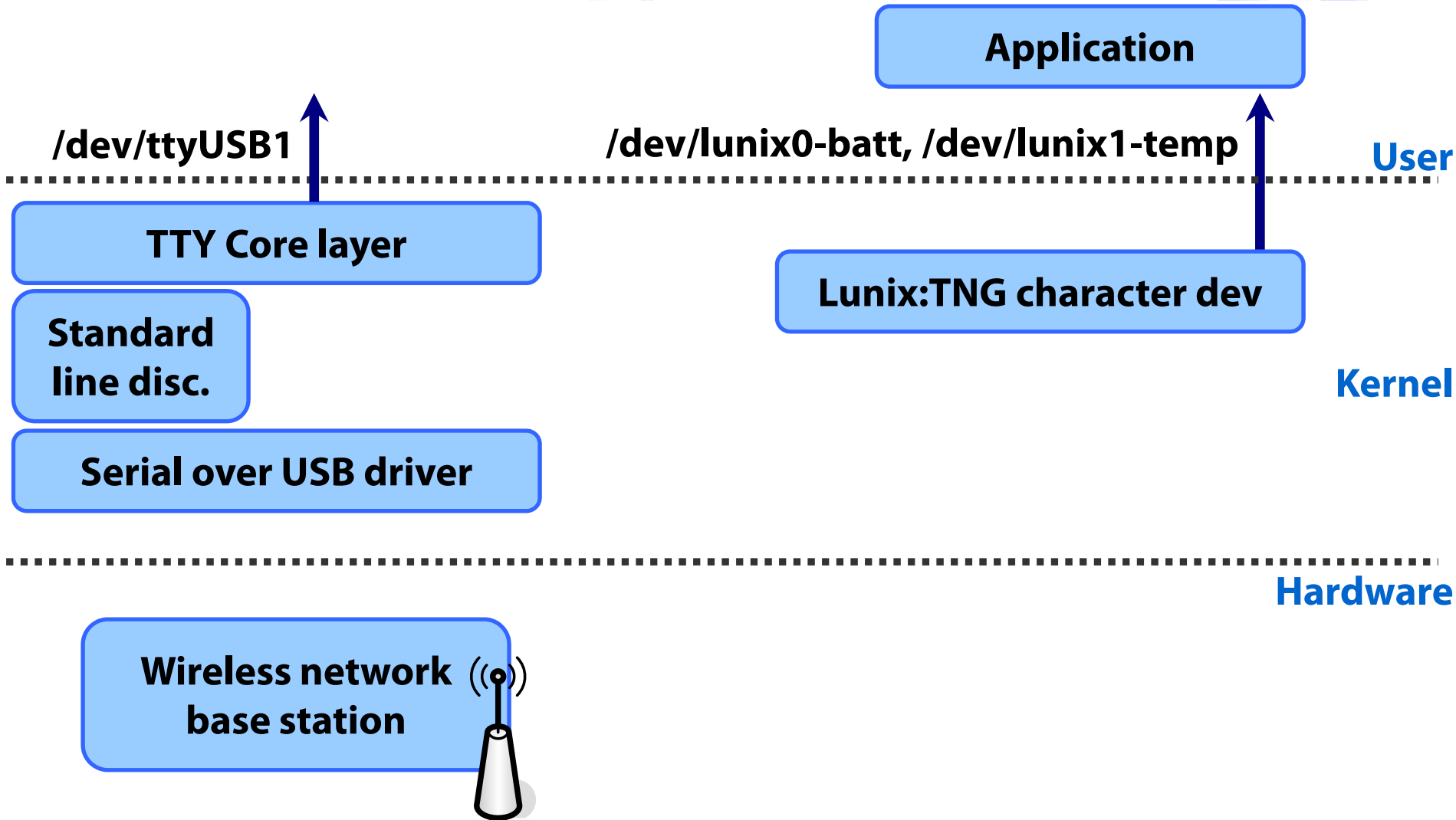
**Wireless network
base station**



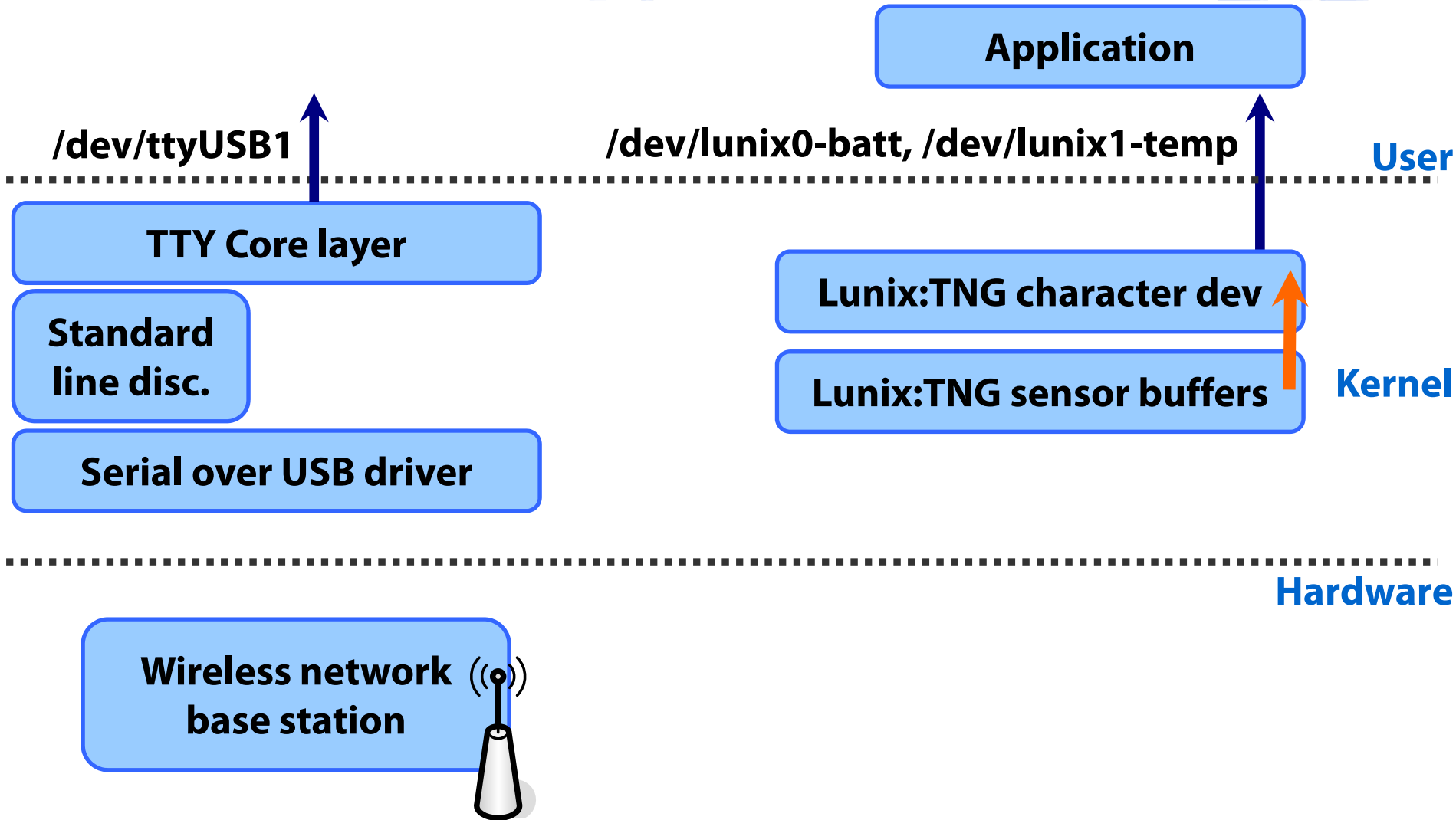
Υπό κατασκευή σύστημα



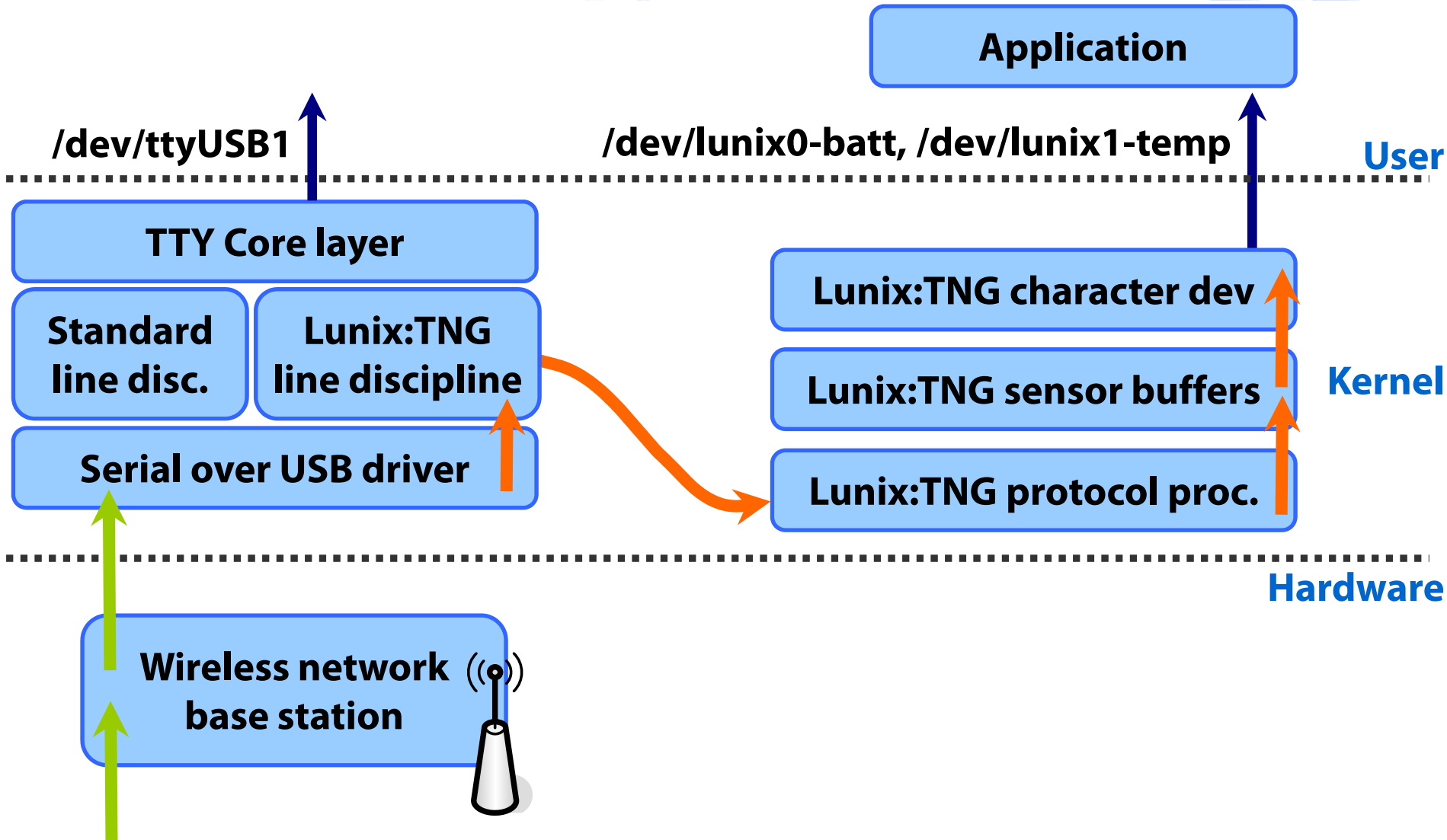
Υπό κατασκευή σύστημα



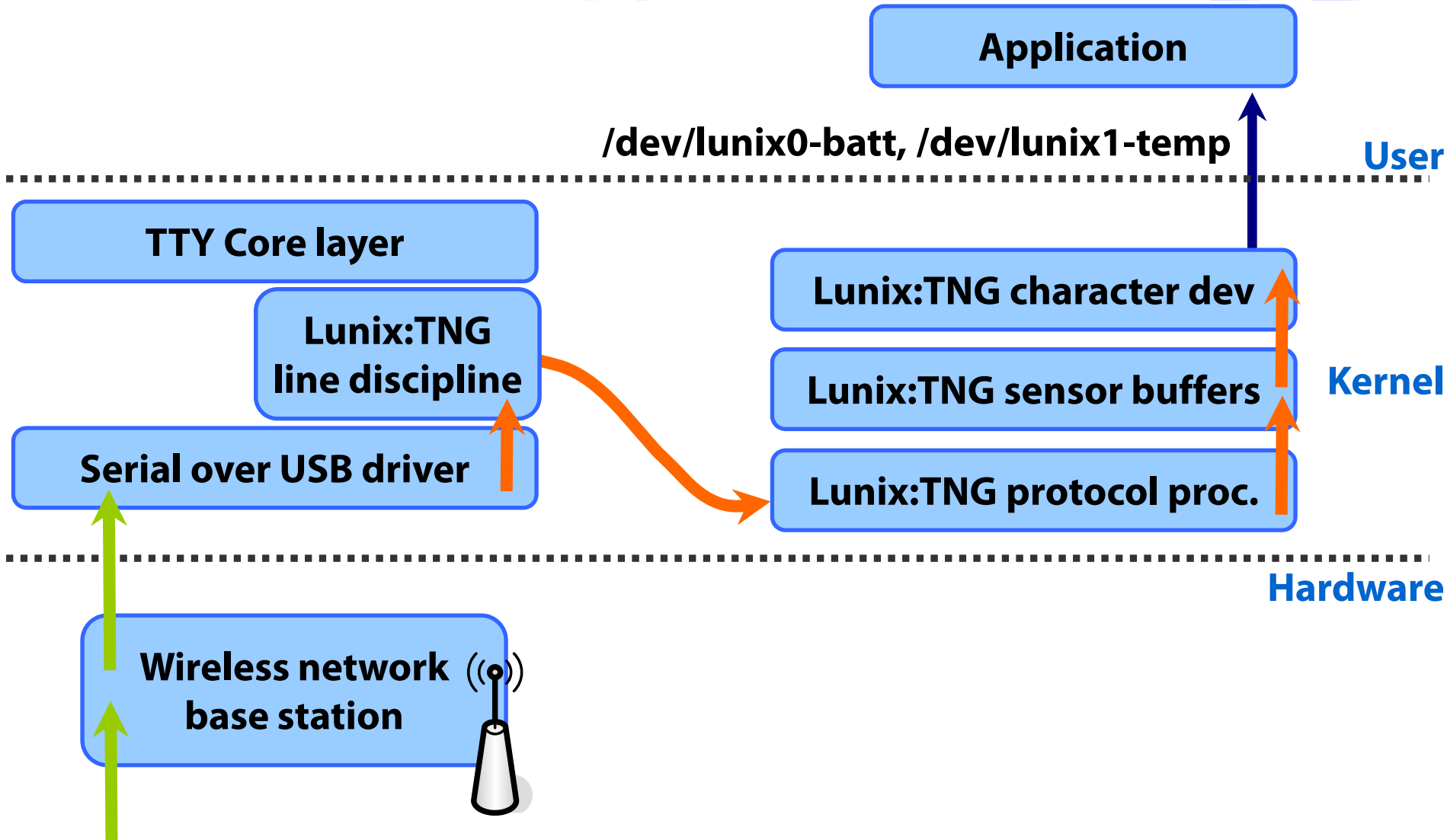
Υπό κατασκευή σύστημα



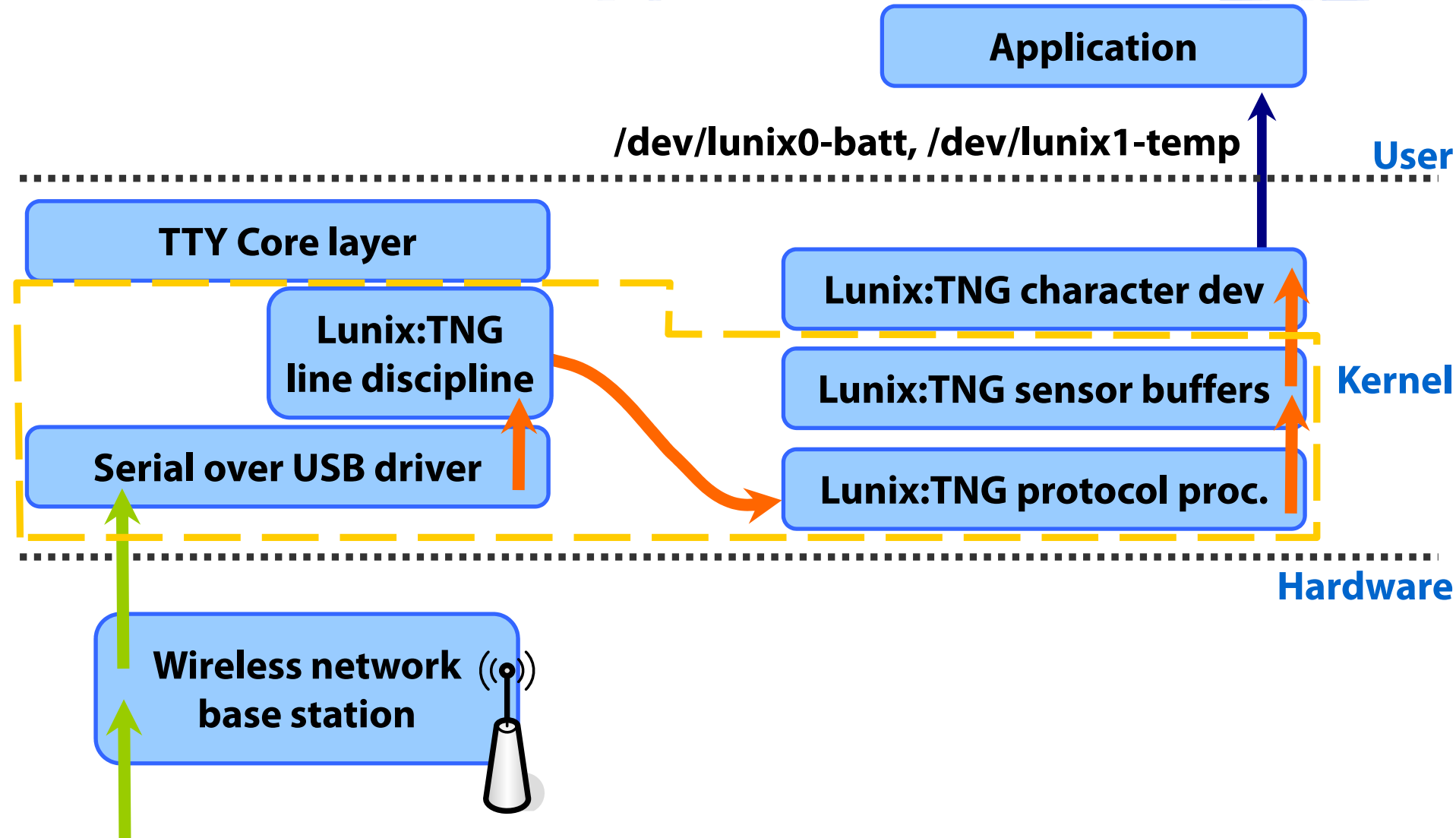
Υπό κατασκευή σύστημα



Υπό κατασκευή σύστημα



Υπό κατασκευή σύστημα



Οδηγοί συσκευών στο Linux



- ◆ Συσκευές χαρκτήρων
 - ➔ τερματικά, σειριακές/παράλληλες θύρες, κάρτες ήχου
- ◆ Συσκευές block
 - ➔ Σκληροί δίσκοι, CD-ROM, δισκέτες
- ◆ Συσκευές δικτύου
 - ➔ Κάρτες δικτύου, PPP

Παράδειγμα χρήσης οδηγού (1)

```
user@utopia:~/linux-tng$ make
gcc -Wall -Werror -o mk-lunix-lookup mk-lunix-lookup.c -lm
./mk-lunix-lookup >lunix-lookup.h
make -C /usr/src/linux-headers-5.10.0-19-amd64
M=/home/user/linux-tng modules
make[1]: Entering directory '/usr/src/linux-headers-5.10.0-19-
amd64'
  CC [M]  /home/user/linux-tng/lunix-module.o
  CC [M]  /home/user/linux-tng/lunix-chrdev.o
  CC [M]  /home/user/linux-tng/lunix-ldisc.o
  CC [M]  /home/user/linux-tng/lunix-protocol.o
  CC [M]  /home/user/linux-tng/lunix-sensors.o
  LD [M]  /home/user/linux-tng/lunix.o
  MODPOST /home/user/linux-tng/Module.symvers
  CC [M]  /home/user/linux-tng/lunix.mod.o
  LD [M]  /home/user/linux-tng/lunix.ko
make[1]: Leaving directory '/usr/src/linux-headers-5.10.0-19-
amd64'
gcc -Wall -Werror -o linux-attach linux-attach.c
user@utopia:~/linux-tng$
```

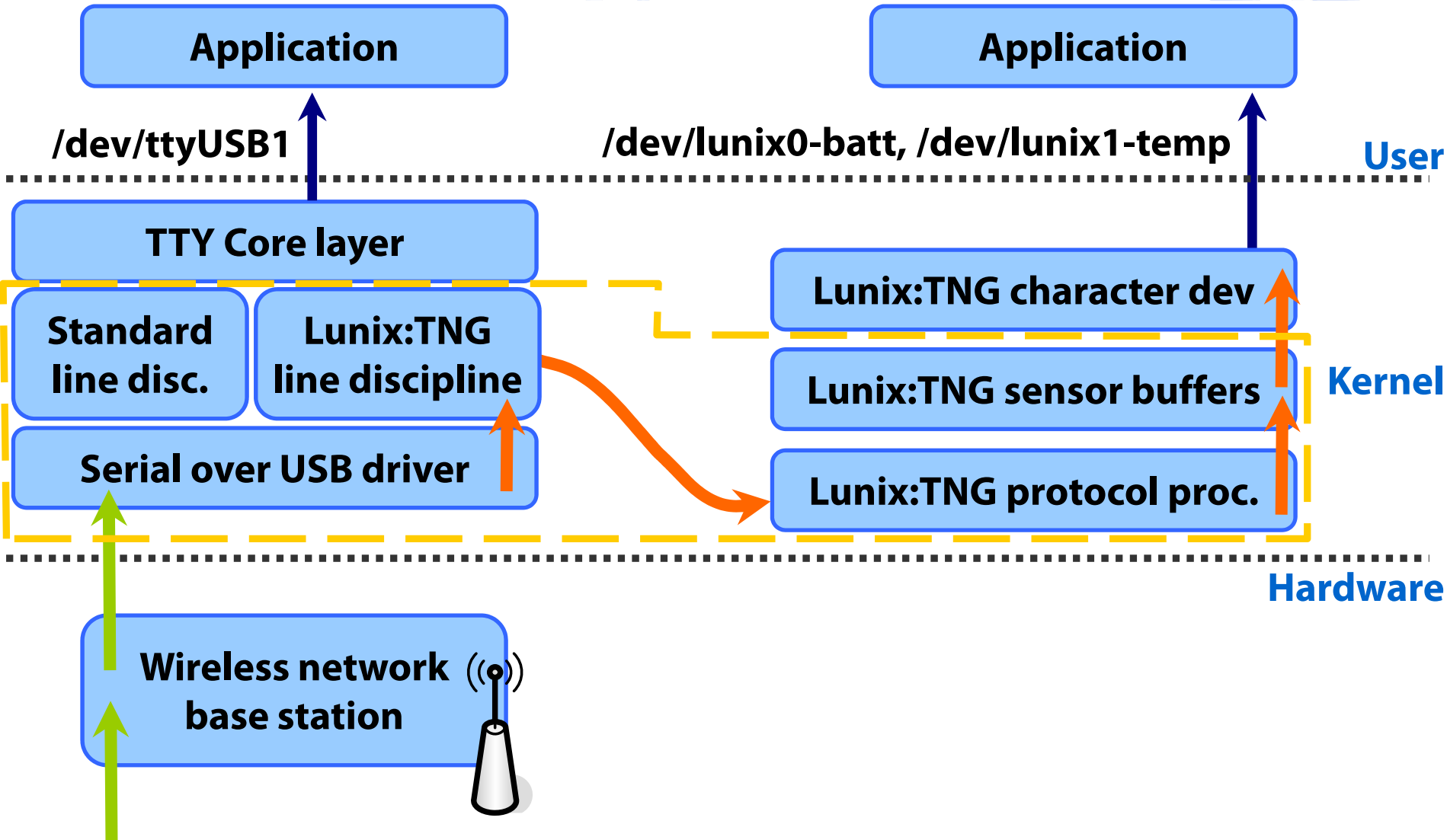

Παράδειγμα χρήσης οδηγού (2)

```
user@utopia:~/linux-tng$ su -  
Password:  
utopia:~# cd ~user/linux-tng  
utopia:/home/user/linux-tng# insmod ./linux.ko  
utopia:/home/user/linux-tng# ./mk-linux-devs.sh  
utopia:/home/user/linux-tng# ./linux-attach /dev/ttyUSB1  
tty_open: looking for lock  
tty_open: trying to open /dev/ttyUSB1  
tty_open: /dev/ttyUSB1 (fd=3) Line discipline set on  
/dev/ttyUSB1, press ^C to release the TTY...
```

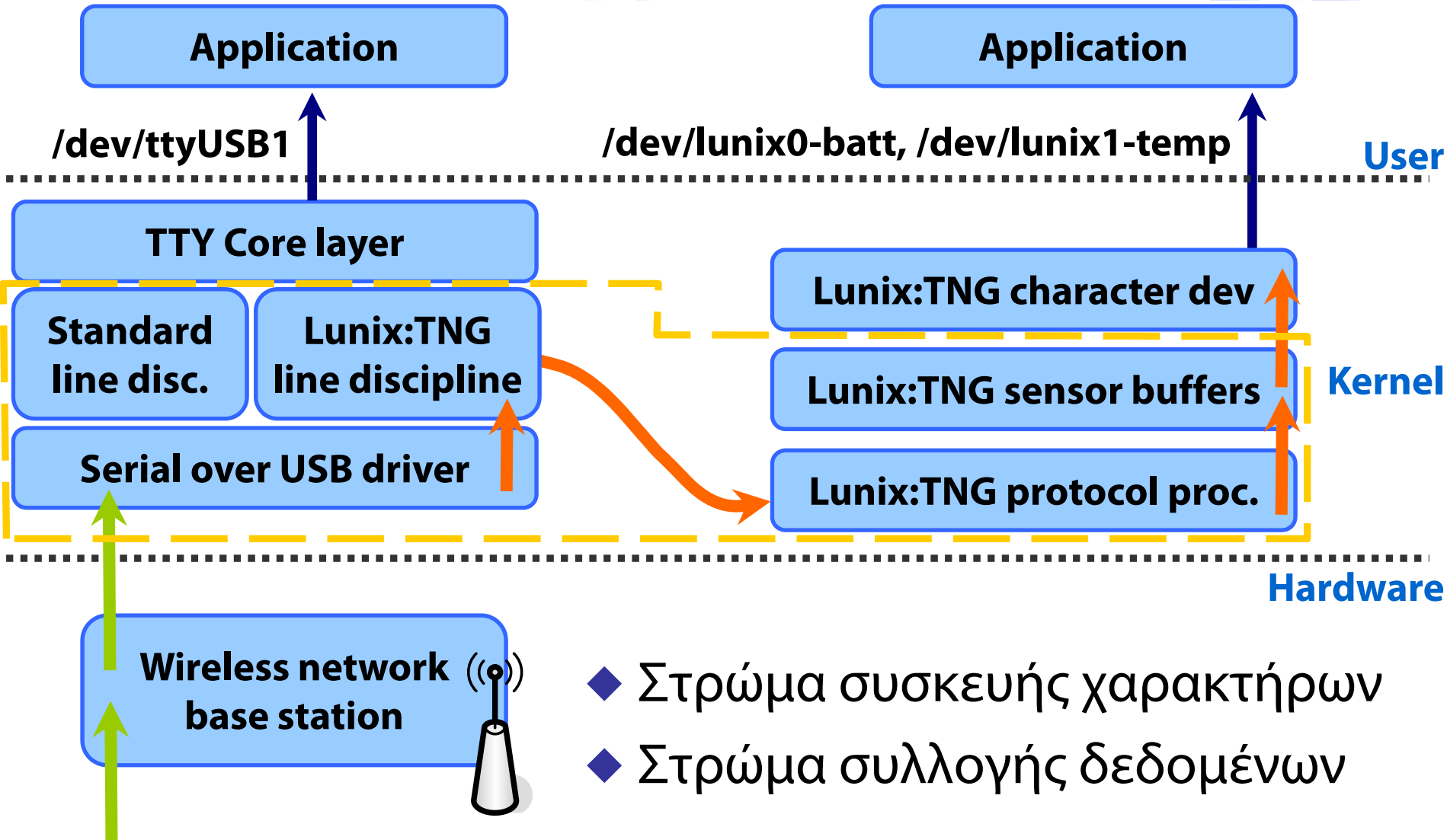
Οπότε μετά:

```
user@utopia:~$ cat /dev/linux2-temp  
27.791 27.791 27.693 27.791 ^C
```

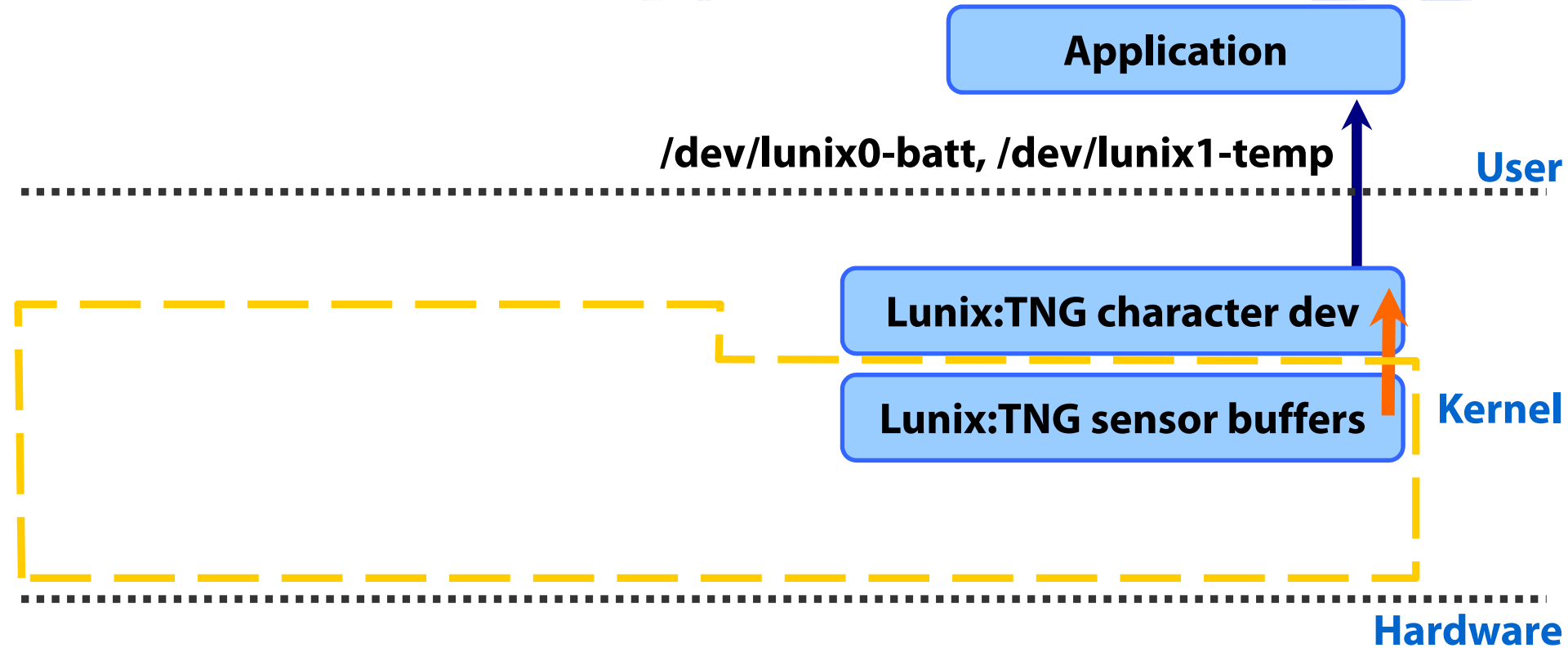
Υπό κατασκευή σύστημα



Υπό κατασκευή σύστημα



Στρώμα συσκευής χαρκτήρων



Τα πάντα είναι αρχεία

```
$ ls -l /dev
```

```
crw-rw----  1 root  audio    14,   3 Jul  5  2000 /dev/dsp
crw-rw-rw-   1 root   root      1,   3 Jul 21  2002 /dev/null
crw-----   1 root   root      4,   1 Apr 22 18:10 /dev/tty1
crw-rw----  1 root  dialout   4,  64 Jul  5  2000 /dev/ttyS0
crw-rw-rw-   1 root   root      1,   5 Jul 21  2002 /dev/zero
brw-rw----  1 root   disk      3,   0 Jul  5  2000 /dev/hda
brw-rw----  1 root  floppy    2,   0 Jul  5  2000 /dev/fd0
```

- ◆ Ειδικά αρχεία, πύλες πρόσβασης σε συσκευές
 - ➔ Κατάλογος /dev
- ◆ Κλήσεις συστήματος στο ειδικό αρχείο
 - ➔ open, close, read, write, lseek, ioctl

Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (1)

```
$ ls -l /dev
```

```
crw-rw----  1 root  audio    14,   3 Jul  5  2000 /dev/dsp
crw-rw-rw-  1 root  root      1,   3 Jul 21  2002 /dev/null
crw-----  1 root  root      4,   1 Apr 22 18:10 /dev/tty1
crw-rw----  1 root  dialout  4,  64 Jul  5  2000 /dev/ttyS0
crw-rw-rw-  1 root  root      1,   5 Jul 21  2002 /dev/zero
brw-rw----  1 root  disk     3,   0 Jul  5  2000 /dev/hda
brw-rw----  1 root  floppy   2,   0 Jul  5  2000 /dev/fd0
```

◆ Major / minor numbers

Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (1)

```
$ ls -l /dev
```

```
crw-rw----  1 root  audio    14,   3 Jul  5  2000 /dev/dsp
crw-rw-rw-  1 root  root      1,   3 Jul 21  2002 /dev/null
crw-----  1 root  root      4,   1 Apr 22 18:10 /dev/tty1
crw-rw----  1 root  dialout  4,  64 Jul  5  2000 /dev/ttyS0
crw-rw-rw-  1 root  root      1,   5 Jul 21  2002 /dev/zero
brw-rw----  1 root  disk     3,   0 Jul  5  2000 /dev/hda
brw-rw----  1 root  floppy   2,   0 Jul  5  2000 /dev/fd0
```

◆ Major / minor numbers

Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (1)

```
$ ls -l /dev
```

crw-rw----	1	root	audio	14,	3	Jul	5	2000	/dev/dsp
crw-rw-rw-	1	root	root	1,	3	Jul	21	2002	/dev/null
crw-----	1	root	root	4,	1	Apr	22	18:10	/dev/tty1
crw-rw----	1	root	dialout	4,	64	Jul	5	2000	/dev/ttyS0
crw-rw-rw-	1	root	root	1,	5	Jul	21	2002	/dev/zero
brw-rw----	1	root	disk	3,	0	Jul	5	2000	/dev/hda
brw-rw----	1	root	floppy	2,	0	Jul	5	2000	/dev/fd0

◆ Major / minor numbers

➔ major: Είδος συσκευής, καθορίζει τον οδηγό

Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (1)

```
$ ls -l /dev
```

crw-rw----	1	root	audio	14,	3	Jul 5 2000	/dev/dsp
crw-rw-rw-	1	root	root	1,	3	Jul 21 2002	/dev/null
crw-----	1	root	root	4,	1	Apr 22 18:10	/dev/tty1
crw-rw----	1	root	dialout	4,	64	Jul 5 2000	/dev/ttyS0
crw-rw-rw-	1	root	root	1,	5	Jul 21 2002	/dev/zero
brw-rw----	1	root	disk	3,	0	Jul 5 2000	/dev/hda
brw-rw----	1	root	floppy	2,	0	Jul 5 2000	/dev/fd0

◆ Major / minor numbers

- ➔ major: Είδος συσκευής, καθορίζει τον οδηγό
- ➔ minor: Καθορίζει τη συσκευή, πχ. αριθμός σειριακής θύρας

Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (1)

```
$ ls -l /dev
```

crw-rw----	1	root	audio	14,	3	Jul 5 2000	/dev/dsp
crw-rw-rw-	1	root	root	1,	3	Jul 21 2002	/dev/null
crw-----	1	root	root	4,	1	Apr 22 18:10	/dev/tty1
crw-rw----	1	root	dialout	4,	64	Jul 5 2000	/dev/ttyS0
crw-rw-rw-	1	root	root	1,	5	Jul 21 2002	/dev/zero
brw-rw----	1	root	disk	3,	0	Jul 5 2000	/dev/hda
brw-rw----	1	root	floppy	2,	0	Jul 5 2000	/dev/fd0

◆ Major / minor numbers

- ➔ major: Είδος συσκευής, καθορίζει τον οδηγό
- ➔ minor: Καθορίζει τη συσκευή, πχ. αριθμός σειριακής θύρας

Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (1)

```
$ ls -l /dev
```

crw-rw----	1	root	audio	14,	3	Jul 5 2000	/dev/dsp
crw-rw-rw-	1	root	root	1,	3	Jul 21 2002	/dev/null
crw-----	1	root	root	4,	1	Apr 22 18:10	/dev/tty1
crw-rw----	1	root	dialout	4,	64	Jul 5 2000	/dev/ttyS0
crw-rw-rw-	1	root	root	1,	5	Jul 21 2002	/dev/zero
brw-rw----	1	root	disk	3,	0	Jul 5 2000	/dev/hda
brw-rw----	1	root	floppy	2,	0	Jul 5 2000	/dev/fd0

◆ Major / minor numbers

- ➔ major: Είδος συσκευής, καθορίζει τον οδηγό
- ➔ minor: Καθορίζει τη συσκευή, πχ. αριθμός σειριακής θύρας

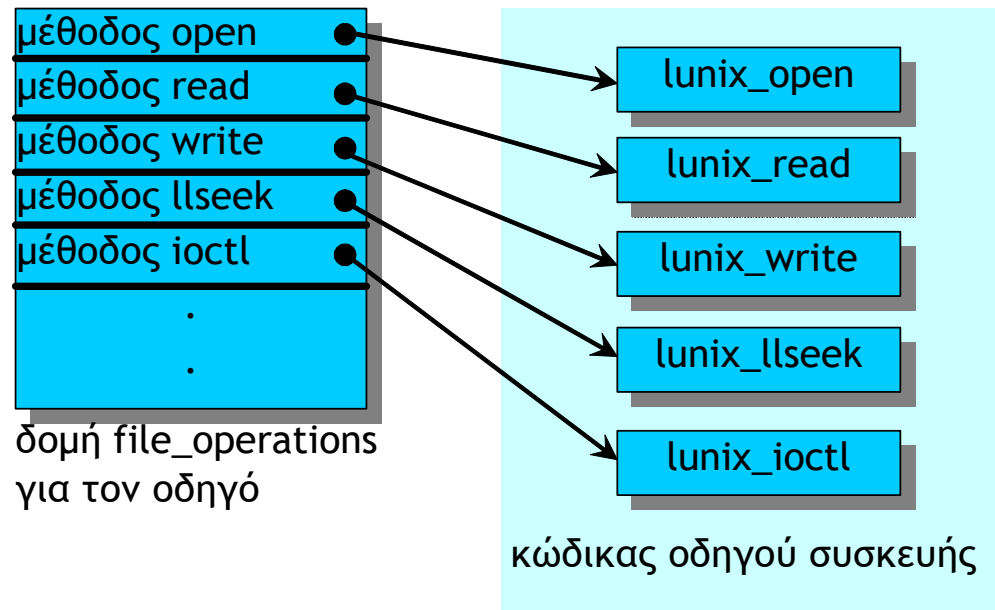
◆ Δέσμευση major number με register_chrdev_region

Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (2)

```
int (*open) (struct inode *, struct file *);  
void (*release) (struct inode *, struct file *);  
ssize_t (*read) (struct file *, char *, size_t, loff_t);  
ssize_t (*write) (struct file *, const char *, size_t, loff_t);  
loff_t (*llseek) (struct file *, loff_t, int);  
int (*unlocked_ioctl) (struct file *, unsigned int, unsigned long);
```

- ◆ Υπηρεσίες οδηγού συσκευής χαρακτήρων
- ◆ Υλοποιούν κλήσεις συστήματος
- ◆ Εκτελούνται από τον πυρήνα
 - ➔ Κατά την πρόσβαση στο ειδικό αρχείο
 - ➔ Μέσω της δομής `file_operations`

Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (3)



◆ Δομή `file_operations`

- ➔ Για κάθε λειτουργία, δείκτης σε αντίστοιχη συνάρτηση
- ➔ Μία για κάθε `major number`
- ➔ Δήλωση κατά την καταχώρηση νέας συσκευής χαρακτήρων (`cdev_add`)

Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (4)

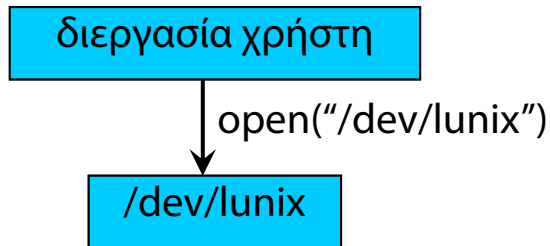


Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (4)

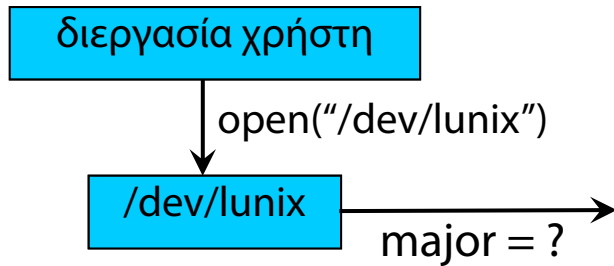


διεργασία χρήστη

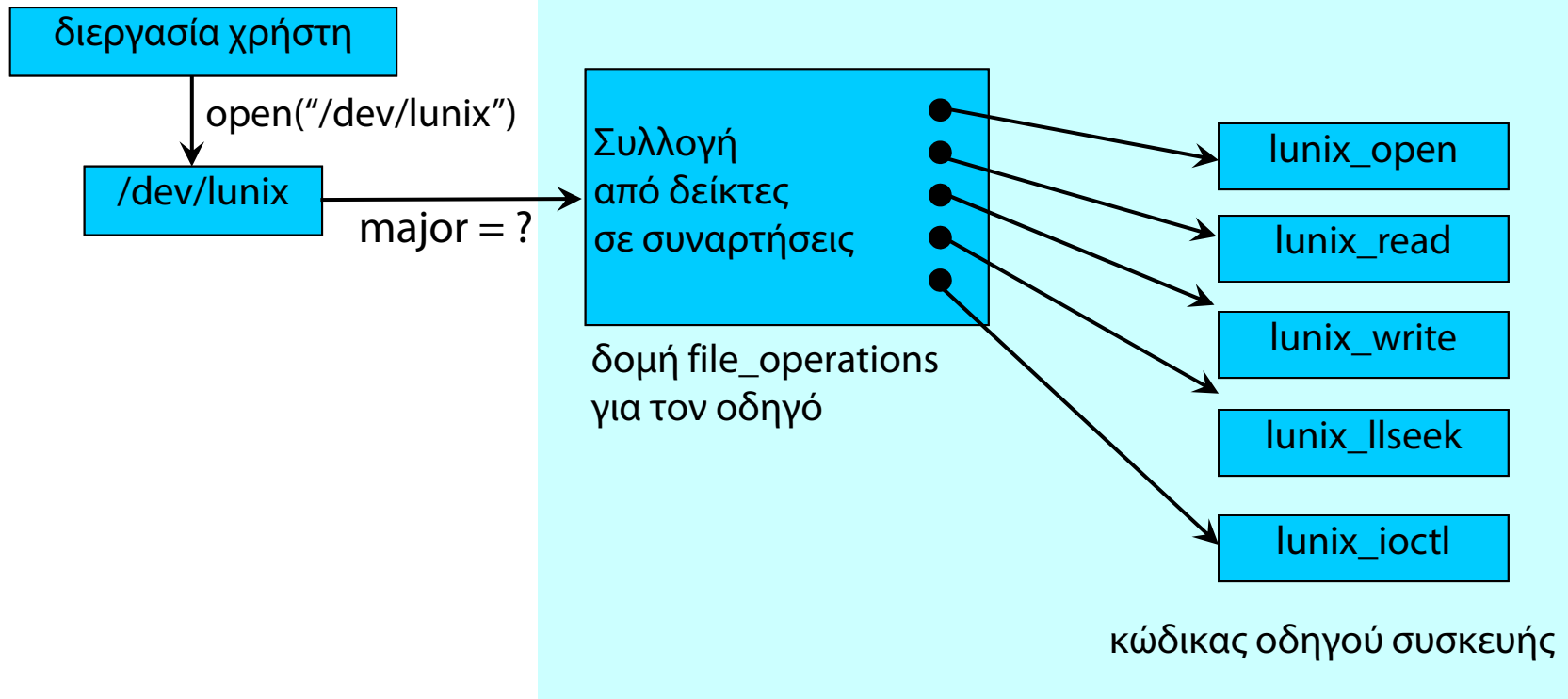
Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (4)



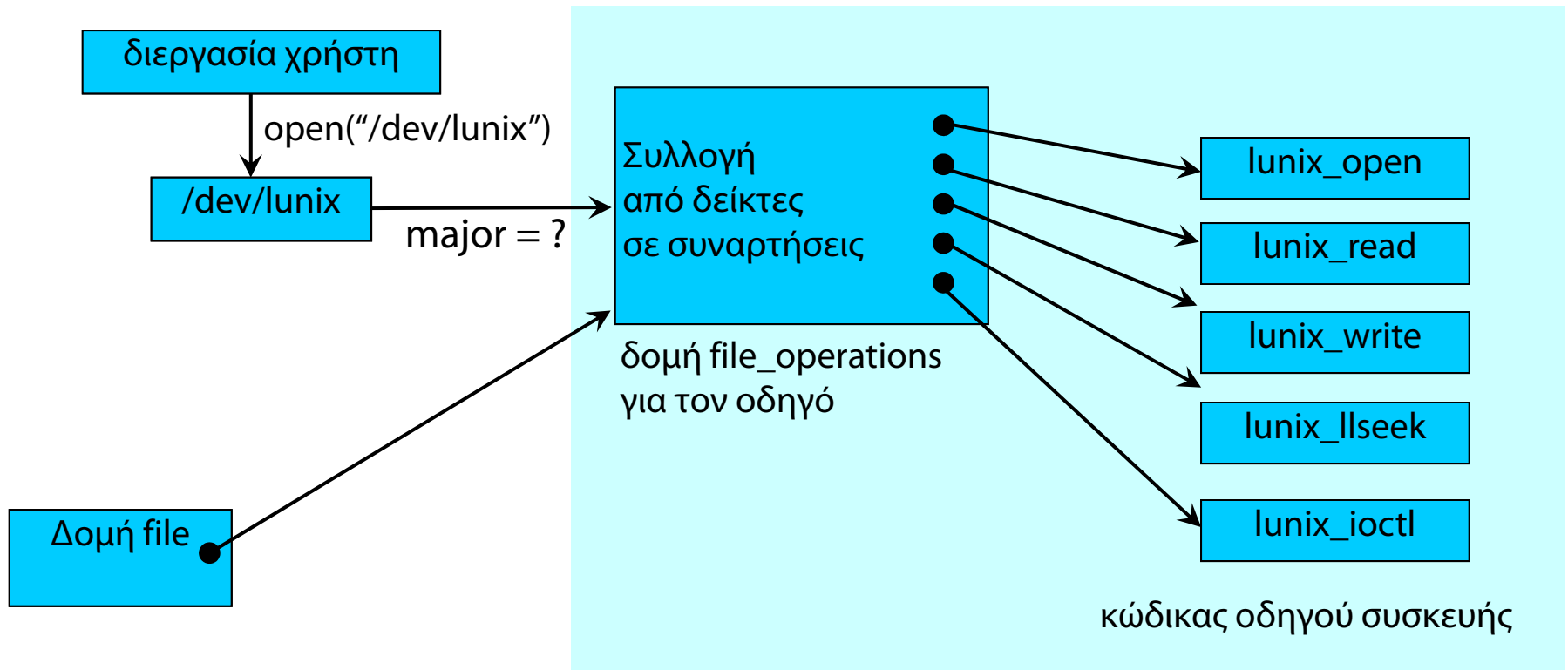
Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (4)



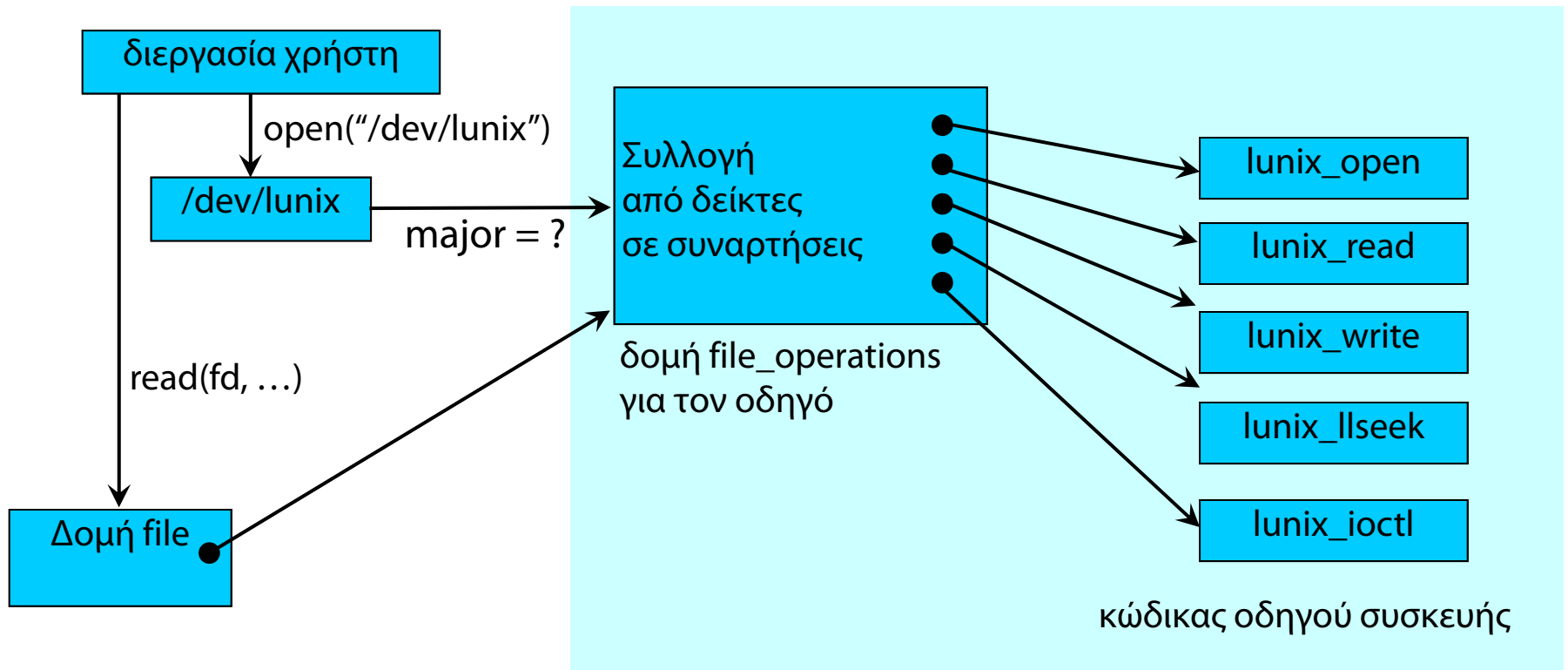
Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (4)



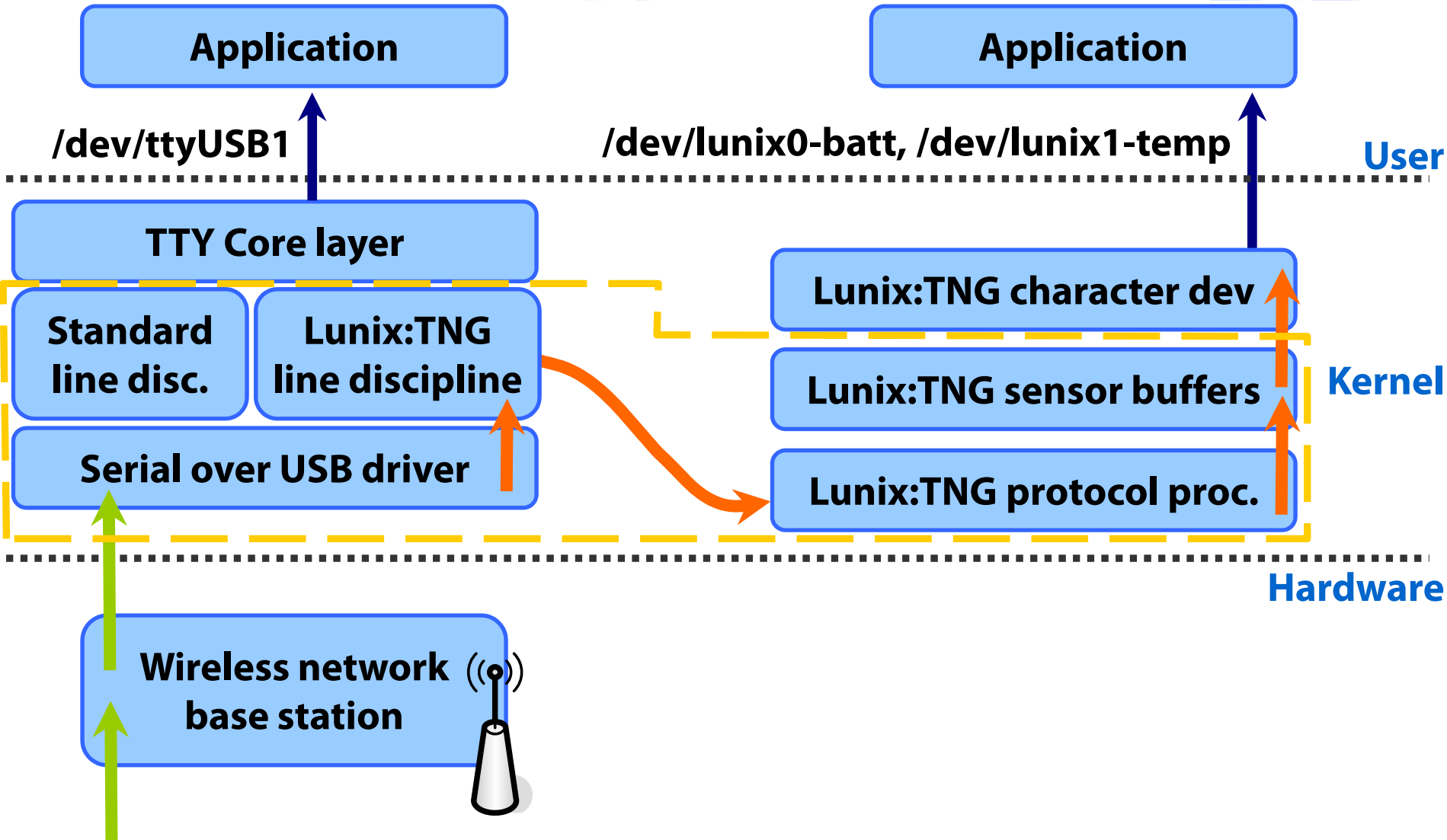
Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (4)



Διεπαφή με τον πυρήνα του Linux (4)



Στρώμα συλλογής δεδομένων



Στρώμα συλλογής δεδομένων

User

Kernel

Hardware

Standard
line disc.

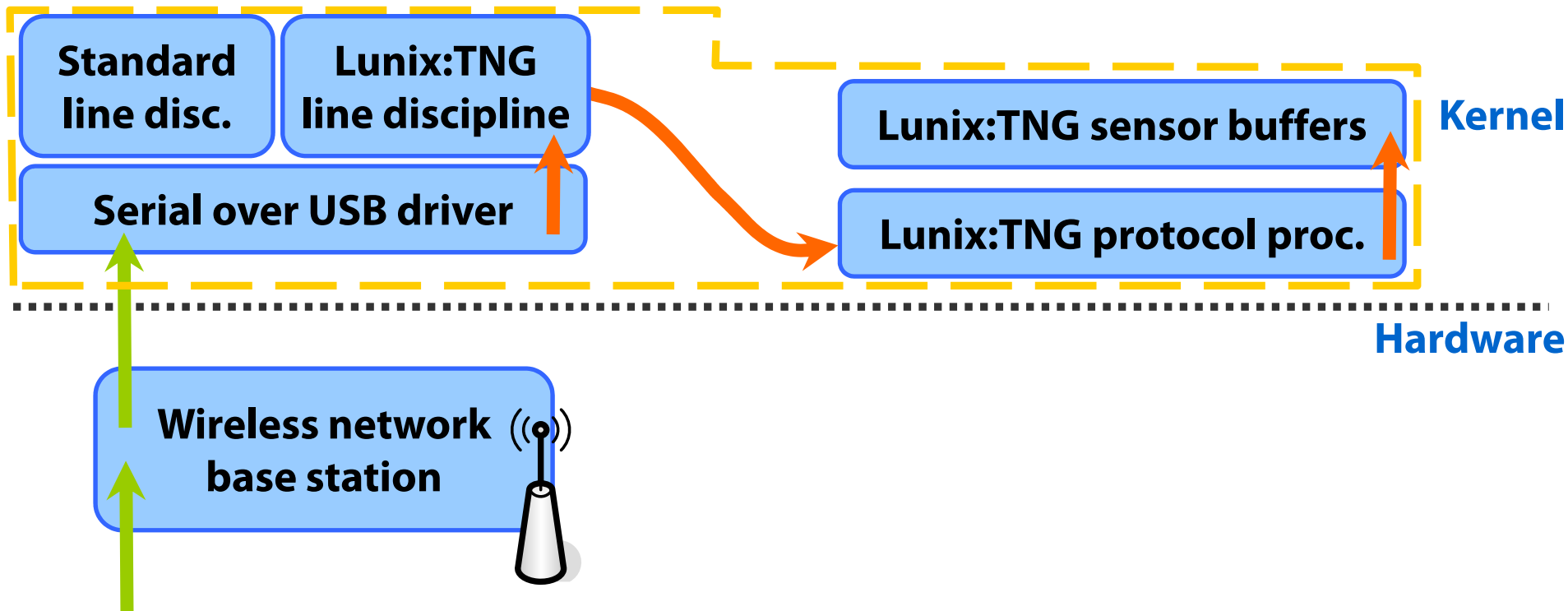
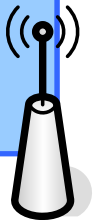
Lunix:TNG
line discipline

Lunix:TNG sensor buffers

Lunix:TNG protocol proc.

Serial over USB driver

Wireless network
base station



Lunix:TNG line discipline

**User
Application**

/dev/ttyUSB1

User

**TTY Core
(struct file_operations *)**

**Standard line discipline
(struct tty_ldisc_ops *)**

Kernel

**Serial over USB driver
(struct tty_driver *)**

Serial Device

Hardware

 **data transfer**
 **function call**

Lunix:TNG line discipline

User
Application

`/dev/ttyUSB1`

User

TTY Core
(`struct file_operations *`)

Standard line discipline
(`struct tty_ldisc_ops *`)

Kernel

Serial over USB driver
(`struct tty_driver *`)

flip buffer

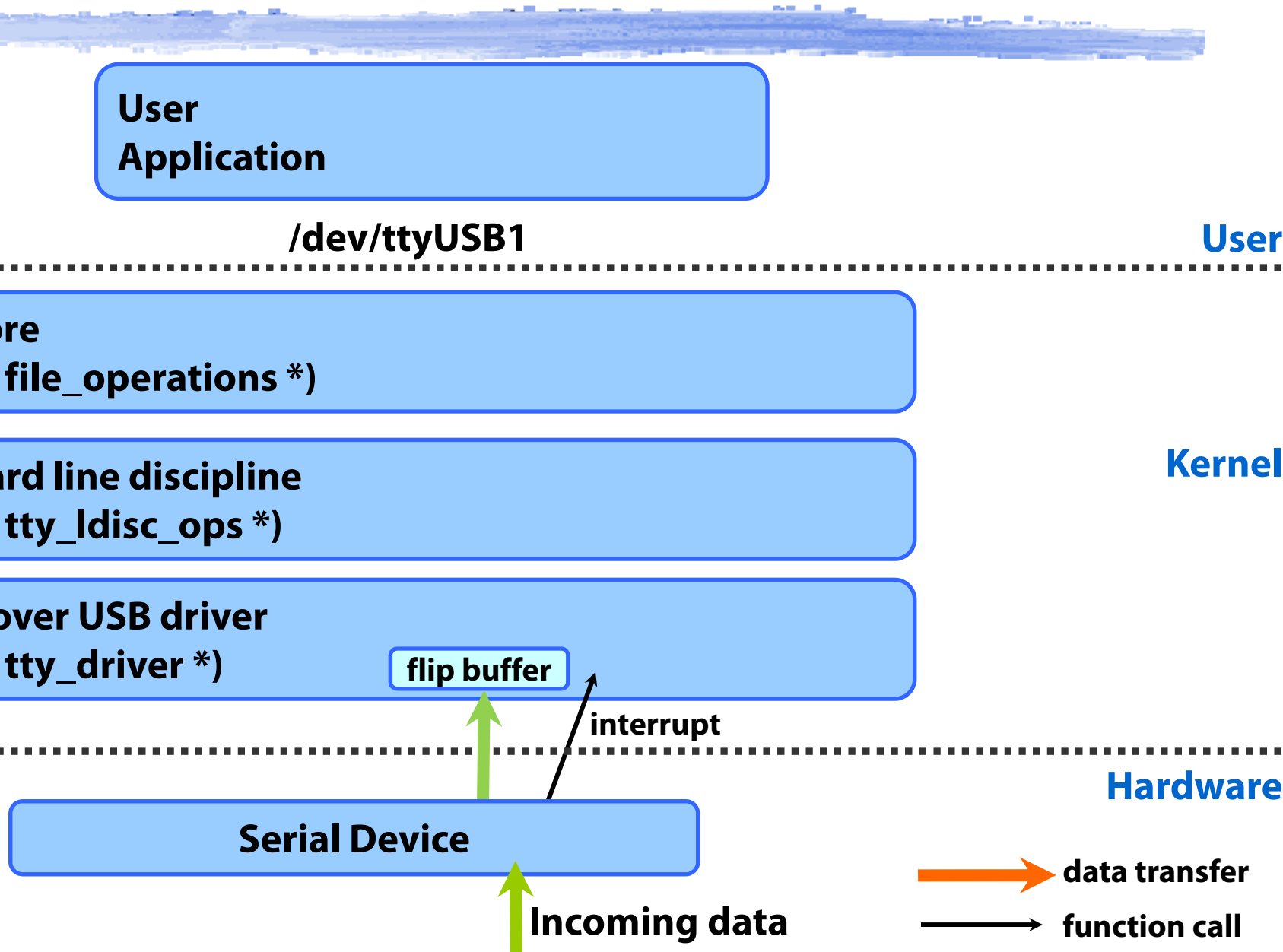
interrupt

Hardware

Serial Device

Incoming data

→ data transfer
→ function call



Lunix:TNG line discipline

User
Application

`/dev/ttyUSB1`

User

TTY Core
(`struct file_operations *`)

Standard line discipline
(`struct tty_ldisc_ops *`)

Serial over USB driver
(`struct tty_driver *`)

Kernel

tty buffer

ldisc→receive_buf

flip buffer

handler

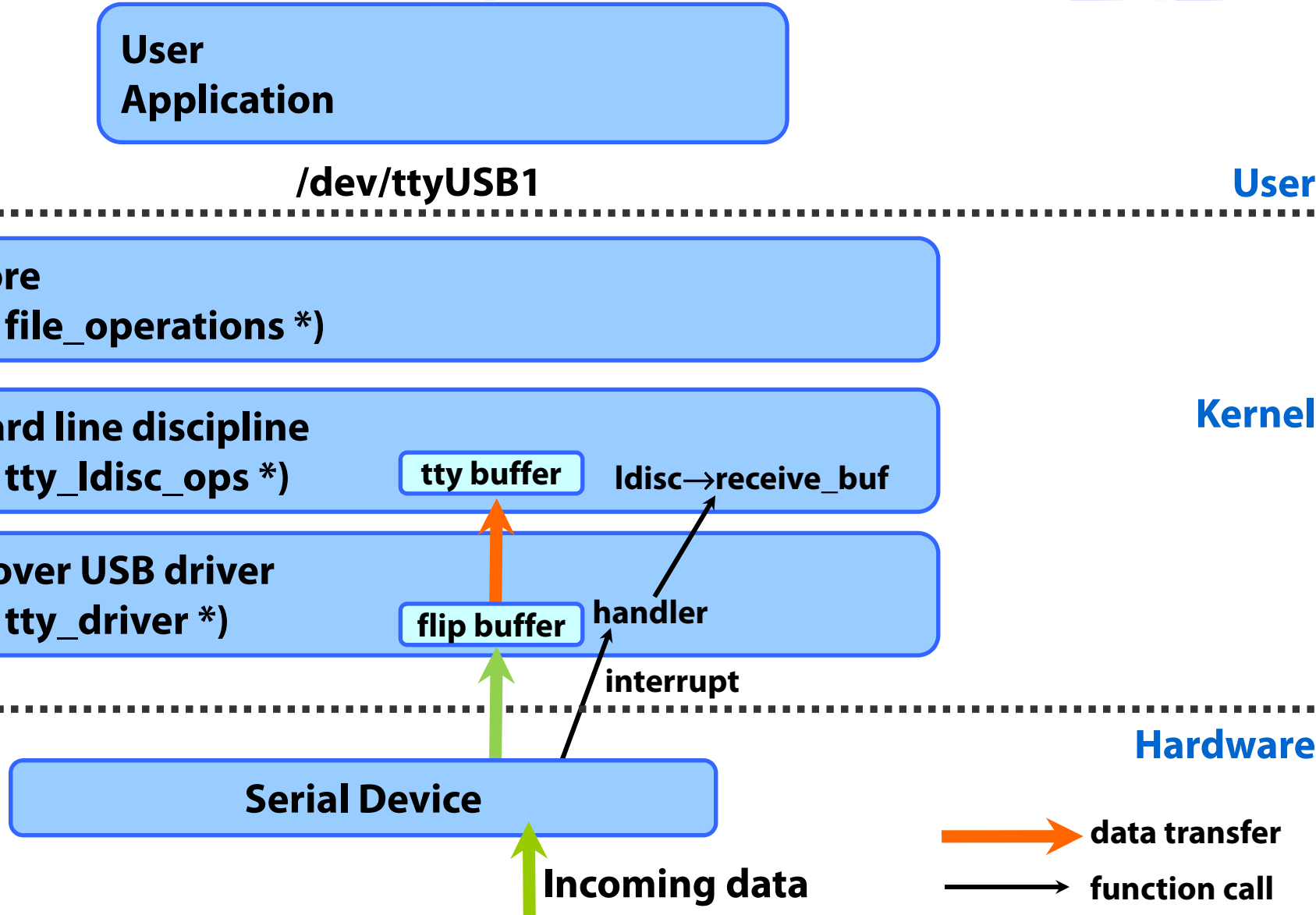
interrupt

Hardware

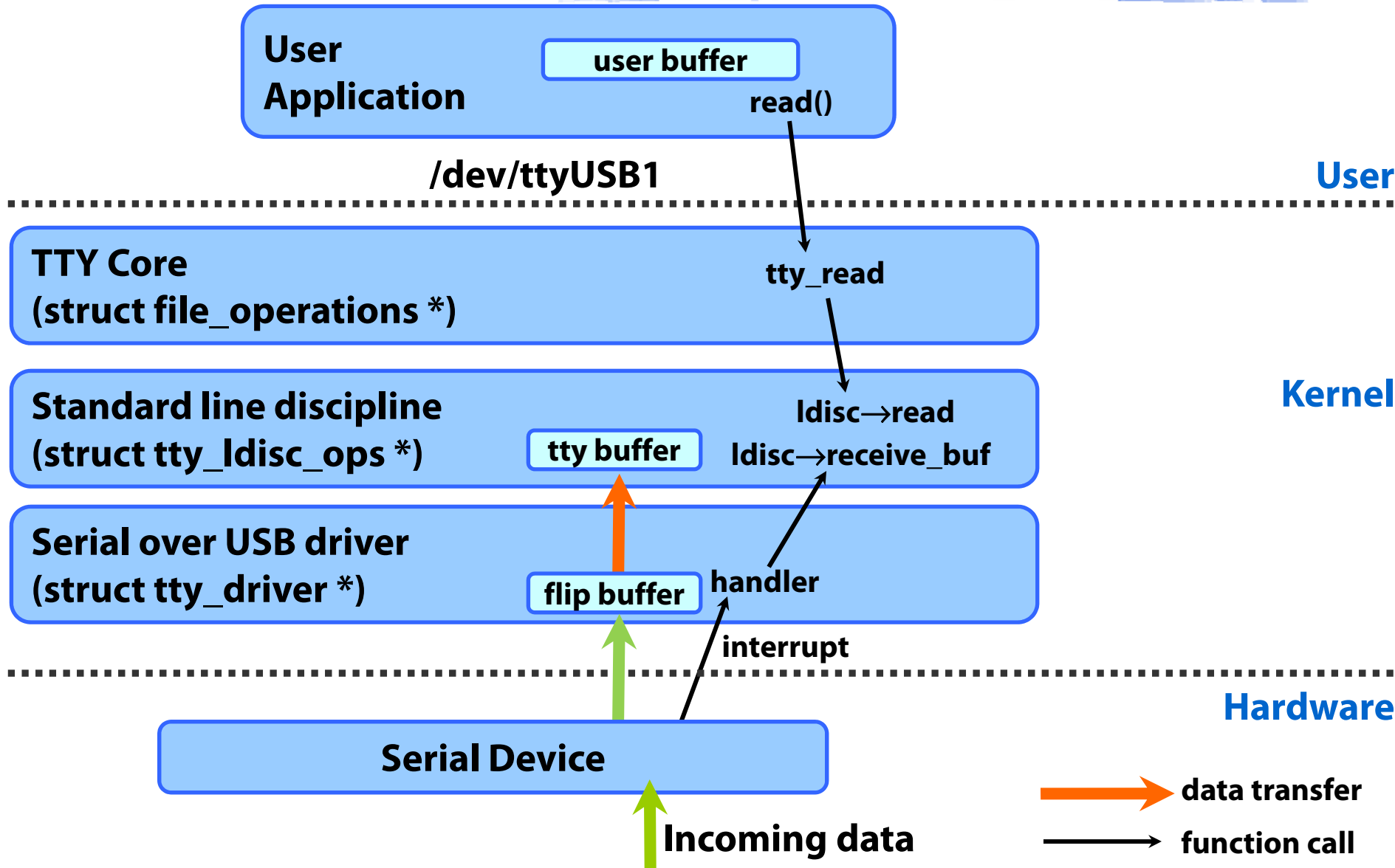
Serial Device

Incoming data

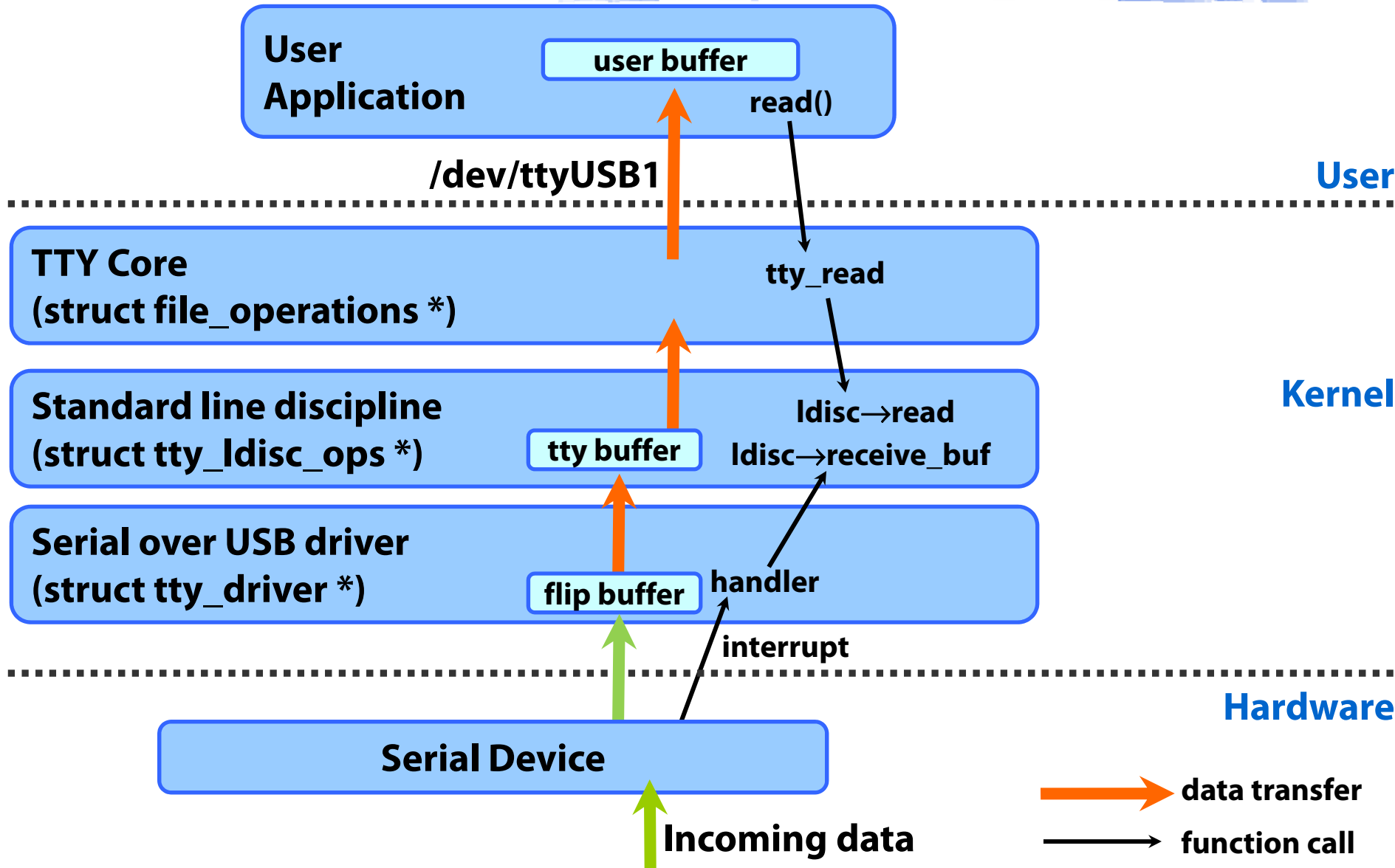
→ data transfer
→ function call



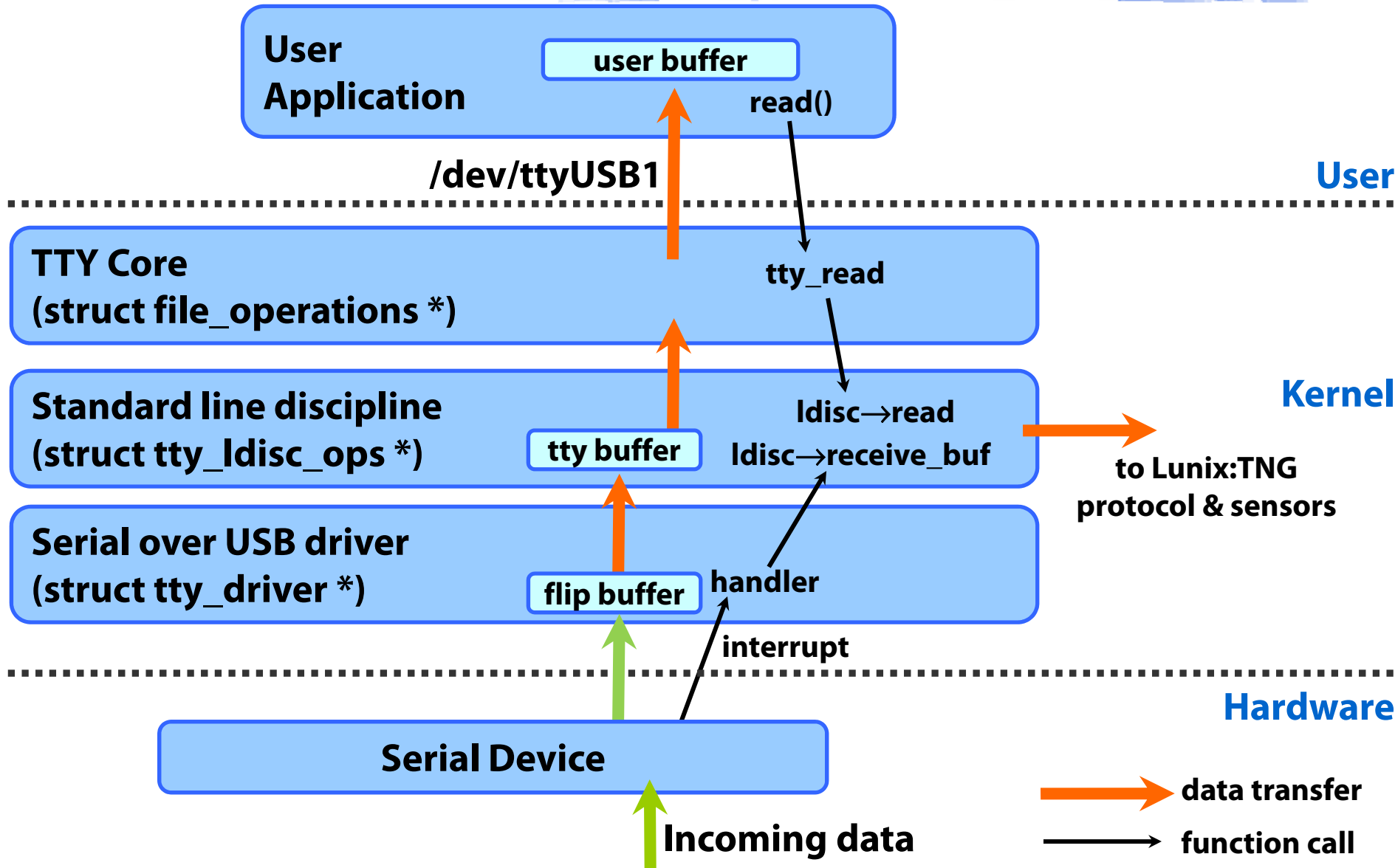
Lunix:TNG line discipline



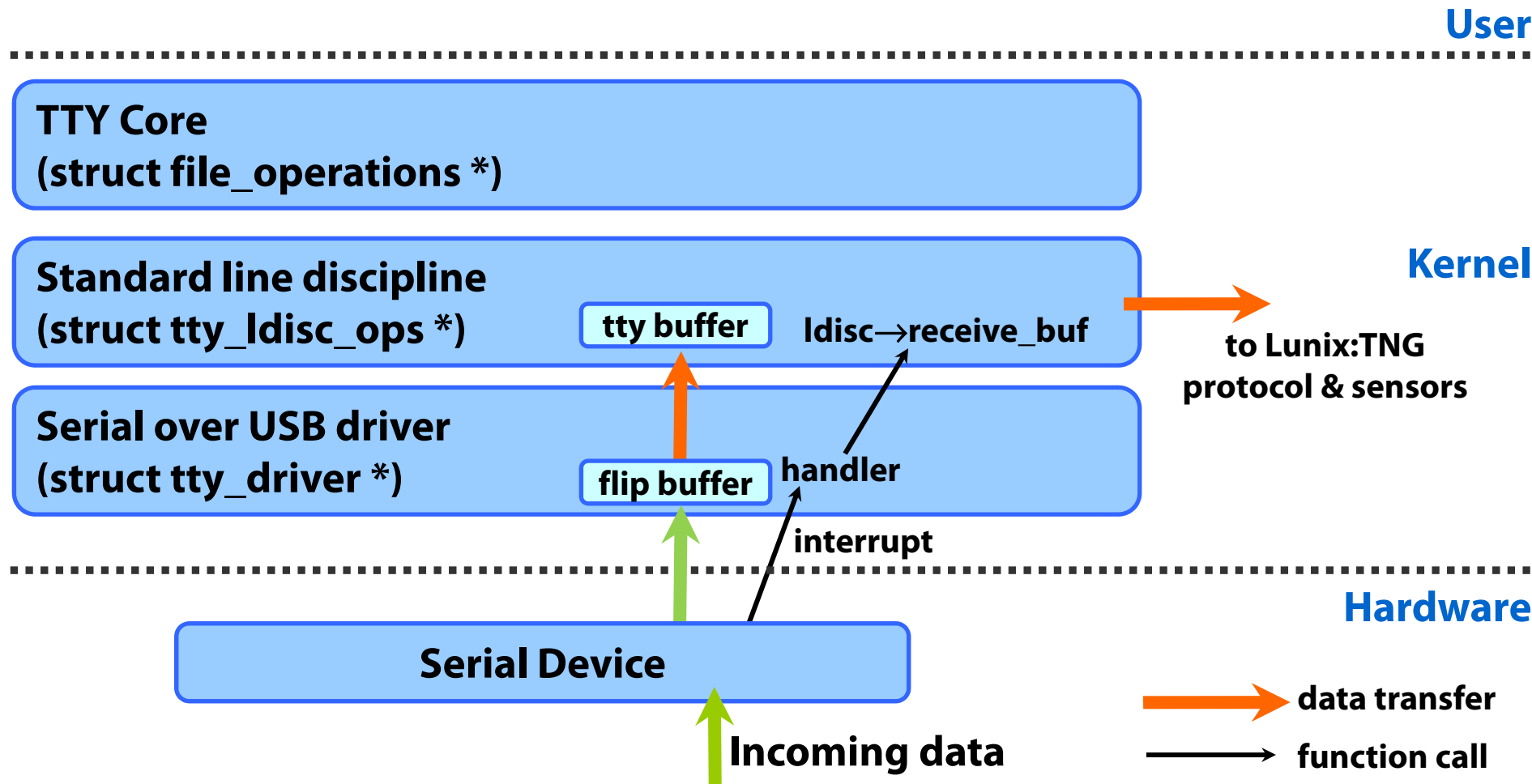
Lunix:TNG line discipline



Lunix:TNG line discipline



Lunix:TNG line discipline



Στρώμα συλλογής δεδομένων (2)

User

Kernel

Hardware

Standard
line disc.

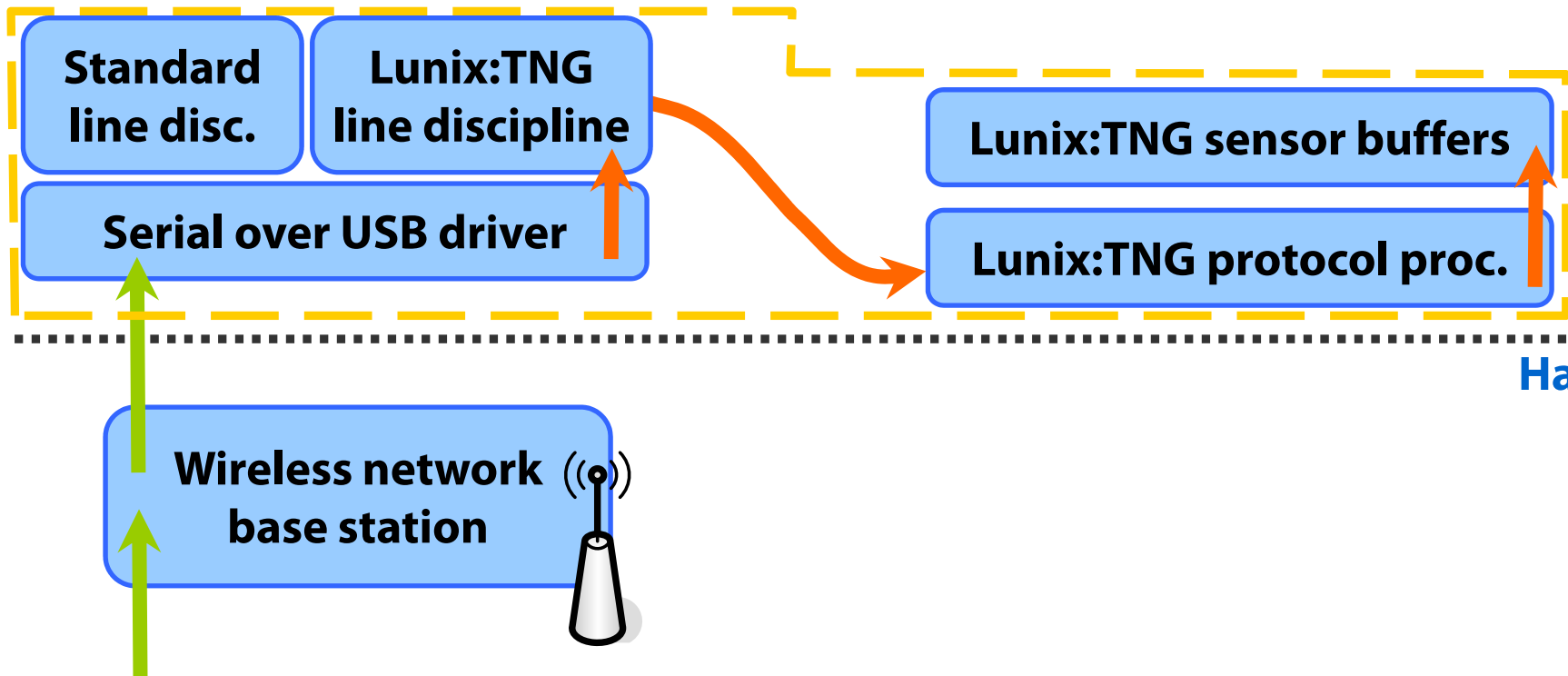
Lunix:TNG
line discipline

Lunix:TNG sensor buffers

Serial over USB driver

Lunix:TNG protocol proc.

Wireless network
base station



Στρώμα συλλογής δεδομένων (2)

User

Kernel

Hardware

Standard
line disc.

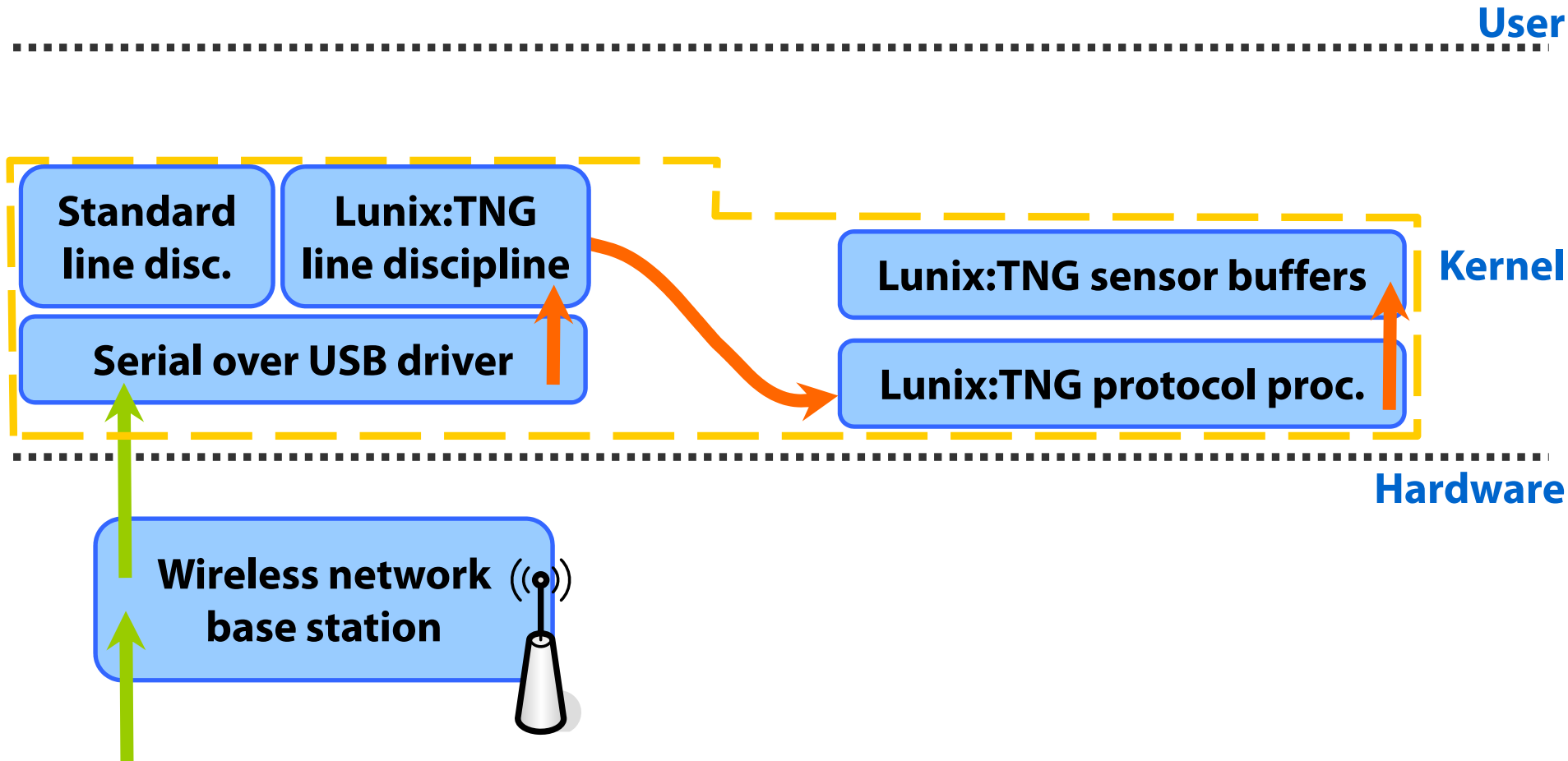
Lunix:TNG
line discipline

Lunix:TNG sensor buffers

Lunix:TNG protocol proc.

Serial over USB driver

Wireless network
base station



Στρώμα συλλογής δεδομένων (2)

User

Kernel

Hardware

Standard
line disc.

Lunix:TNG
line discipline

Lunix:TNG sensor buffers

Serial over USB driver

Lunix:TNG protocol proc.

Wireless network
base station

- ◆ Επεξεργασία πρωτοκόλλου
- ◆ Αποθήκευση σε απομονωτές

Ζητήματα Υλοποίησης (1)

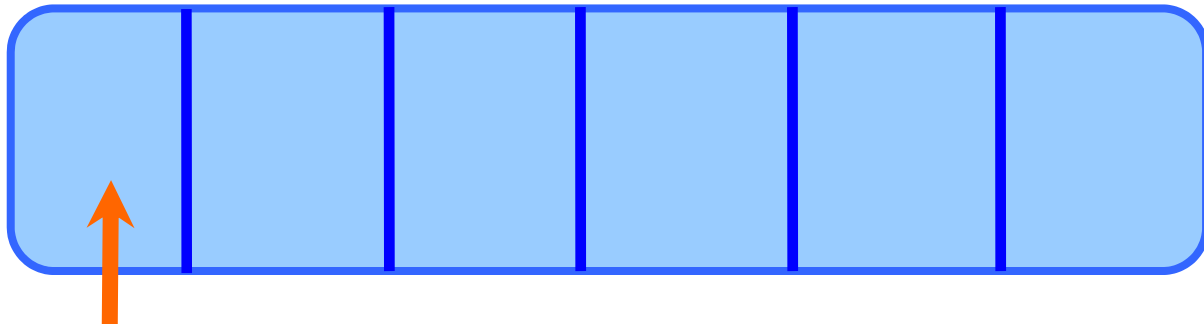
- ◆ Πρόσβαση σε δεδομένα χώρου χρήστη
 - ➔ `copy_to_user()`, `copy_from_user()`
- ◆ Πώς πέφτουν οι διεργασίες για ύπνο;
 - ➔ Μπλοκάρισμα διεργασιών σε ουρές αναμονής
 - ➔ Δεν είναι έτοιμες προς εκτέλεση, δεν καταναλώνουν χρόνο CPU
- ◆ Κρίσιμα τμήματα στον κώδικα του πυρήνα
 - ➔ Σημαφόροι, `spinlocks`

Ζητήματα Υλοποίησης (2)

- ◆ Η `read()` είναι το κέντρο της υλοποίησης
 - ➔ Κρατάει την μορφοποιημένη τιμή σε προσωρινό χώρο μνήμης
 - ➔ Δίνει από εκεί bytes ανάλογα με το `f_pos`
 - ➔ Όταν το `f_pos` είναι μηδέν τι γίνεται;
 - Υπάρχουν φρέσκα δεδομένα; Χρήση timestamps
 - Αν δεν υπάρχουν πρέπει να πέφτει για ύπνο
 - ➔ Όταν έρθουν ξυπνάει και τα επιστρέφει

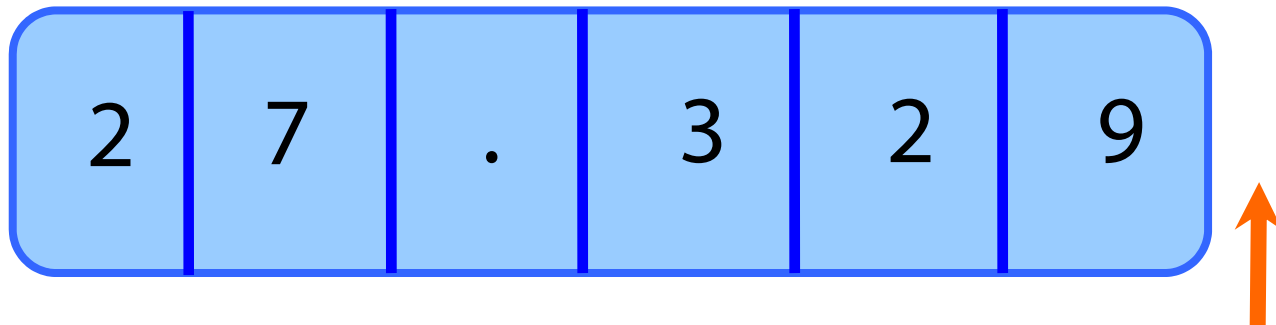
Ζητήματα Υλοποίησης (2)

- ◆ Η `read()` είναι το κέντρο της υλοποίησης
 - ➔ Κρατάει την μορφοποιημένη τιμή σε προσωρινό χώρο μνήμης
 - ➔ Δίνει από εκεί bytes ανάλογα με το `f_pos`
 - ➔ Όταν το `f_pos` είναι μηδέν τι γίνεται;
 - Υπάρχουν φρέσκα δεδομένα; Χρήση timestamps
 - Αν δεν υπάρχουν πρέπει να πέφτει για ύπνο
 - ➔ Όταν έρθουν ξυπνάει και τα επιστρέφει



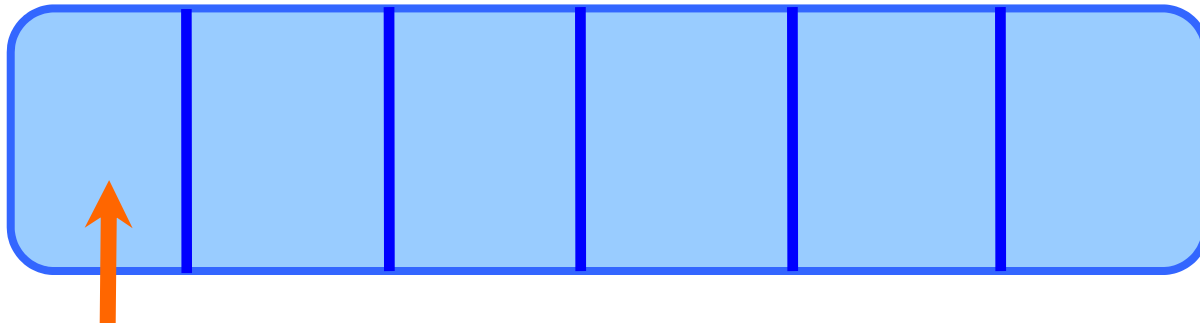
Ζητήματα Υλοποίησης (2)

- ◆ Η `read()` είναι το κέντρο της υλοποίησης
 - ➔ Κρατάει την μορφοποιημένη τιμή σε προσωρινό χώρο μνήμης
 - ➔ Δίνει από εκεί bytes ανάλογα με το `f_pos`
 - ➔ Όταν το `f_pos` είναι μηδέν τι γίνεται;
 - Υπάρχουν φρέσκα δεδομένα; Χρήση timestamps
 - Αν δεν υπάρχουν πρέπει να πέφτει για ύπνο
 - ➔ Όταν έρθουν ξυπνάει και τα επιστρέφει

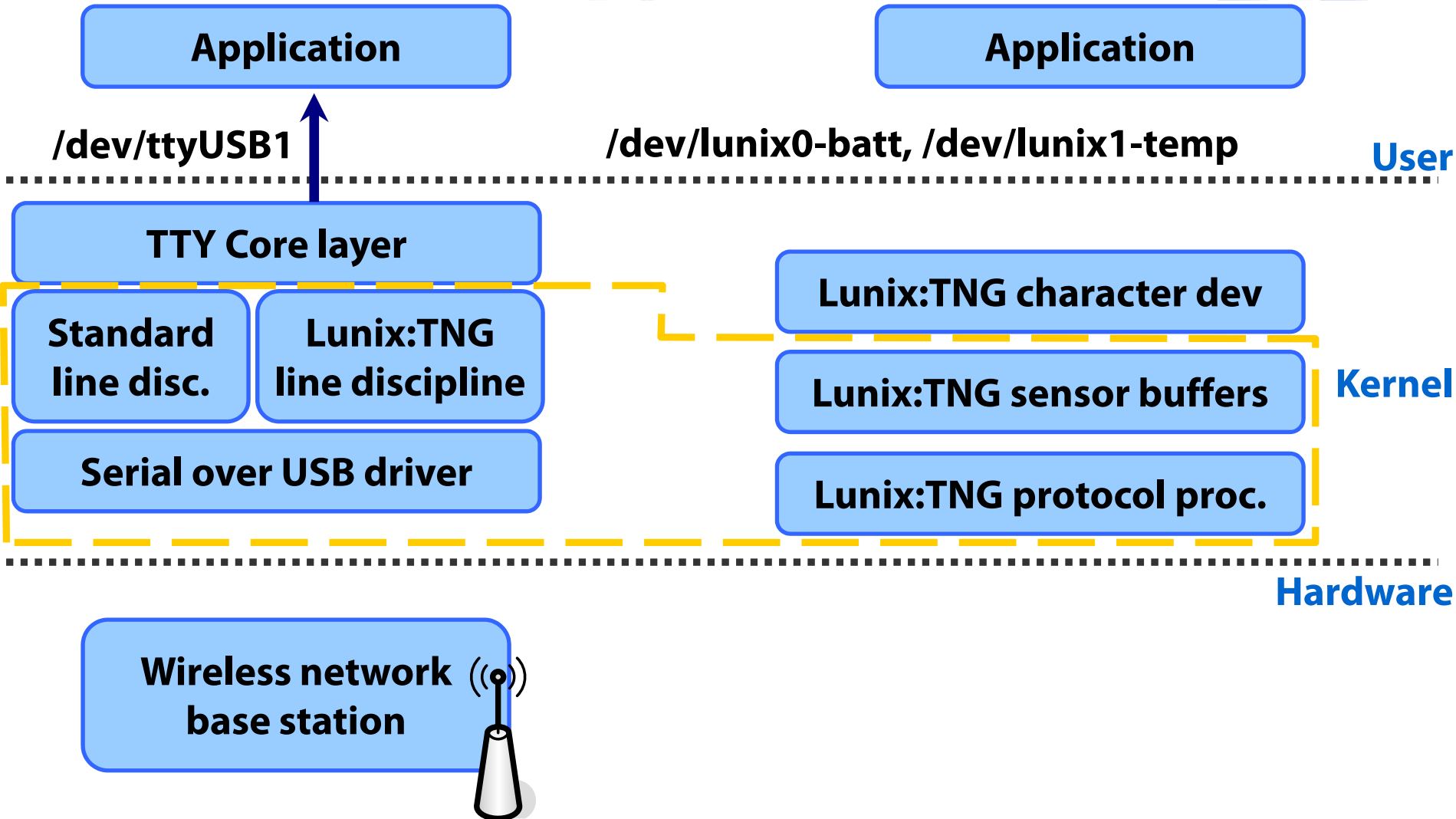


Ζητήματα Υλοποίησης (2)

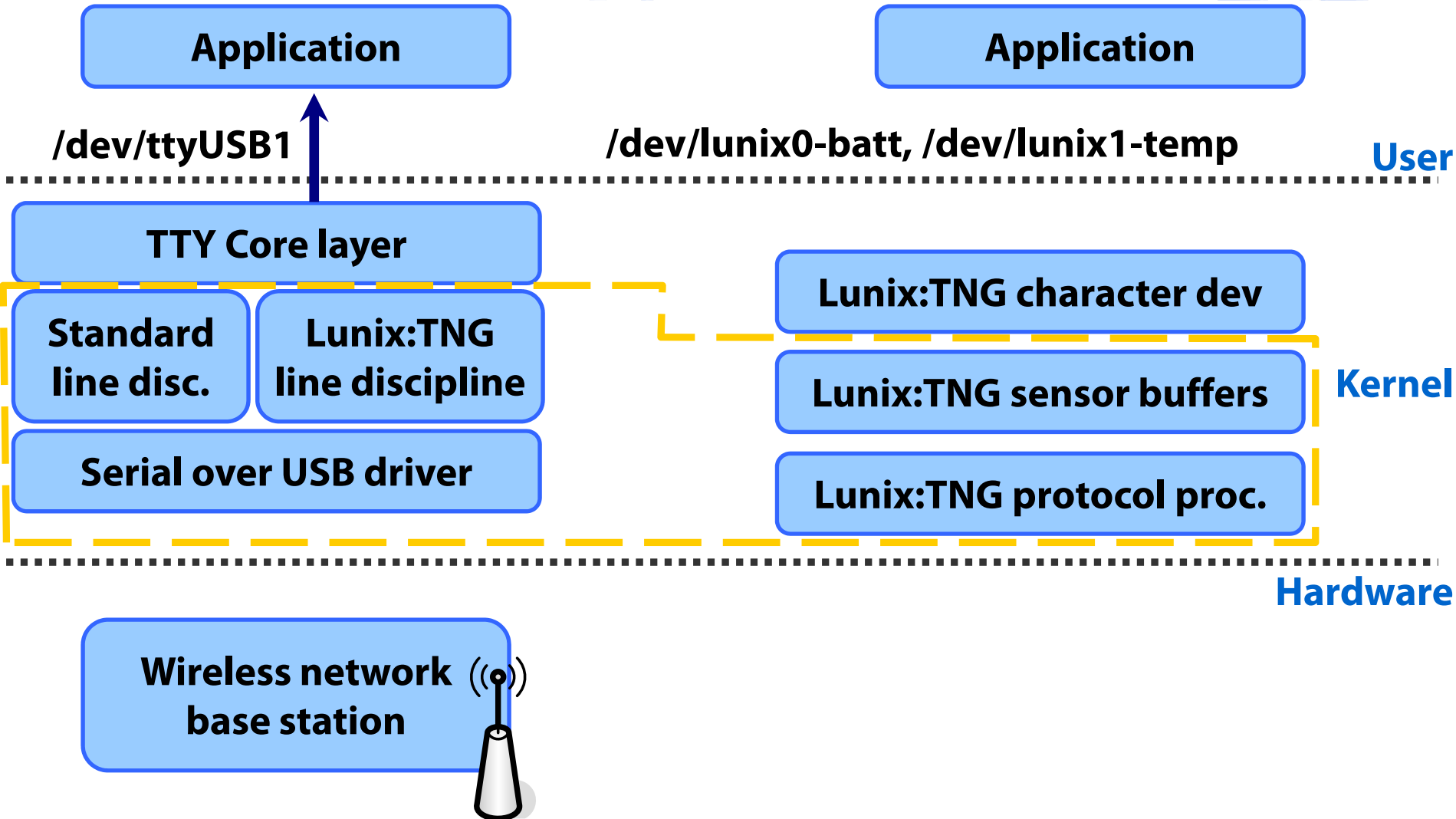
- ◆ Η `read()` είναι το κέντρο της υλοποίησης
 - ➔ Κρατάει την μορφοποιημένη τιμή σε προσωρινό χώρο μνήμης
 - ➔ Δίνει από εκεί bytes ανάλογα με το `f_pos`
 - ➔ Όταν το `f_pos` είναι μηδέν τι γίνεται;
 - Υπάρχουν φρέσκα δεδομένα; Χρήση timestamps
 - Αν δεν υπάρχουν πρέπει να πέφτει για ύπνο
 - ➔ Όταν έρθουν ξυπνάει και τα επιστρέφει



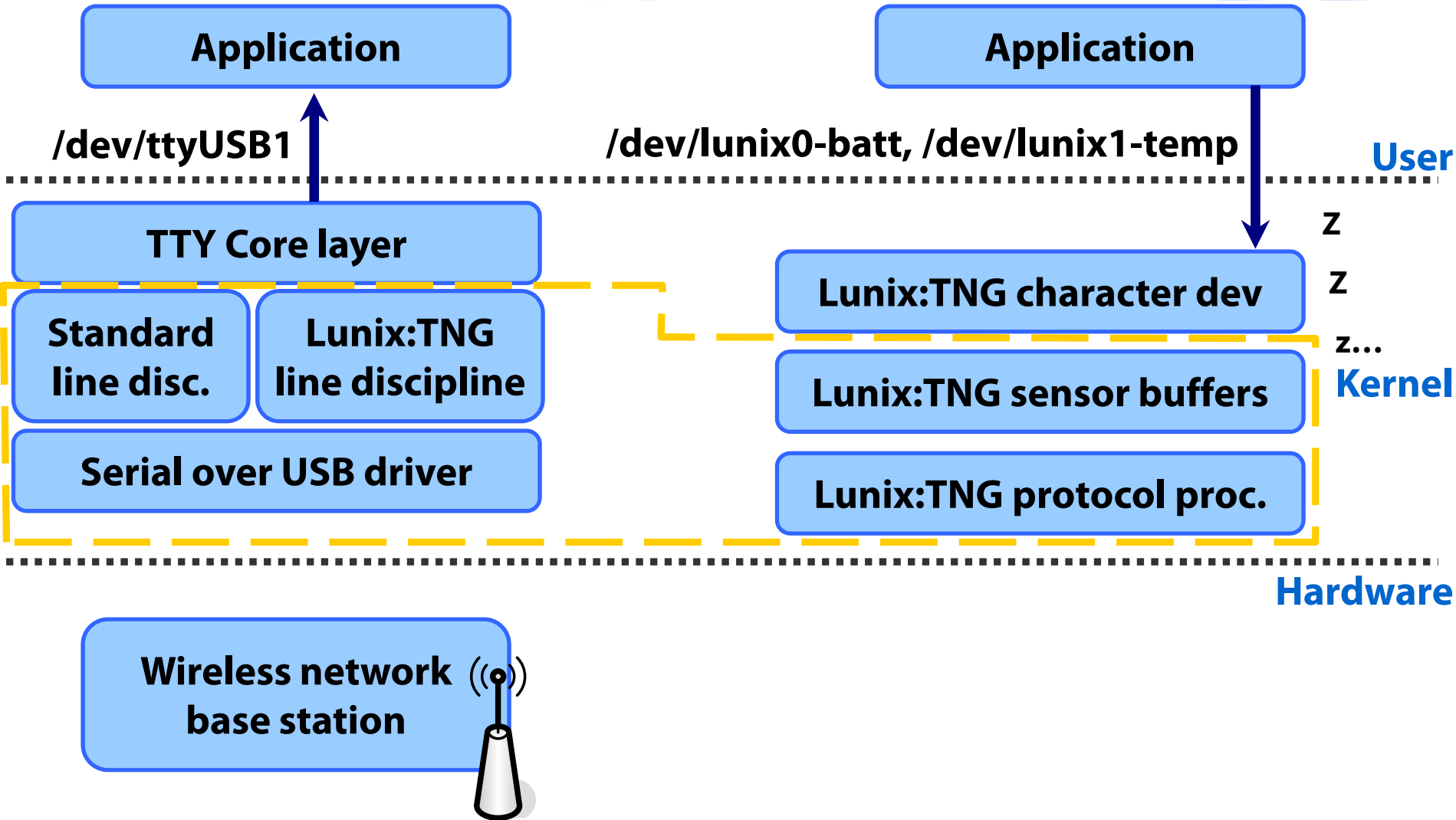
Ζητήματα Υλοποίησης (3)



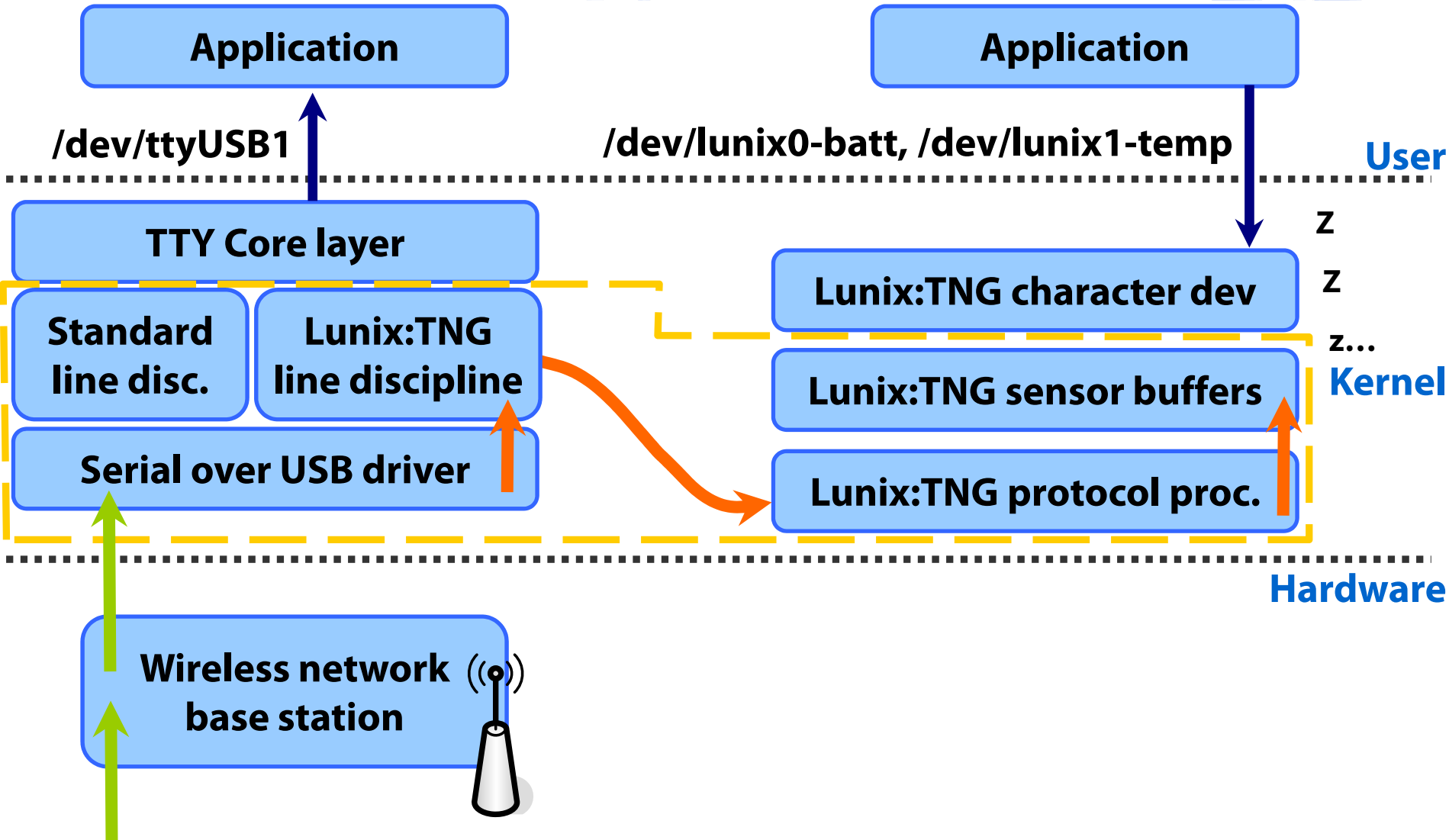
Ζητήματα Υλοποίησης (3)



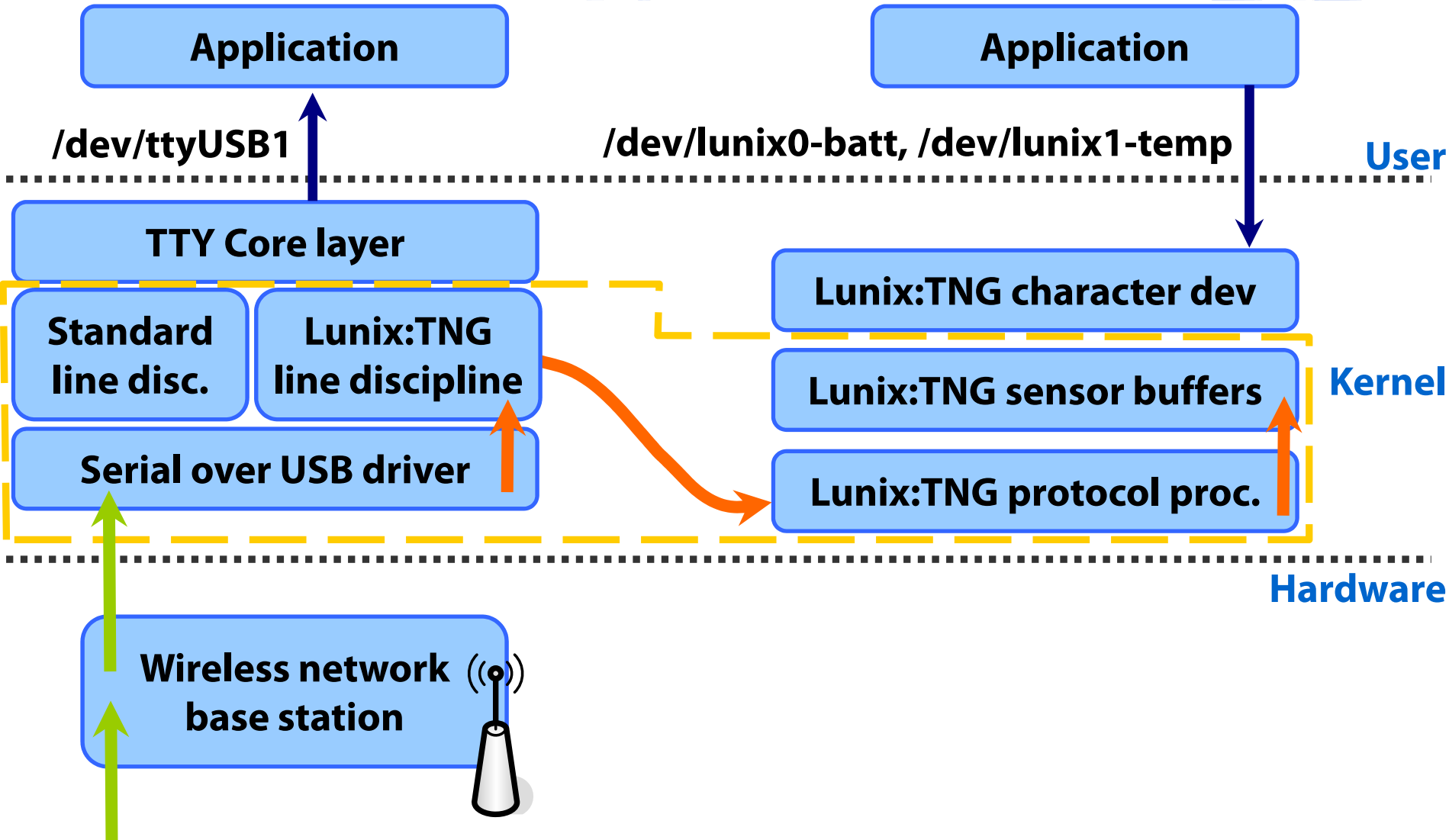
Ζητήματα Υλοποίησης (3)



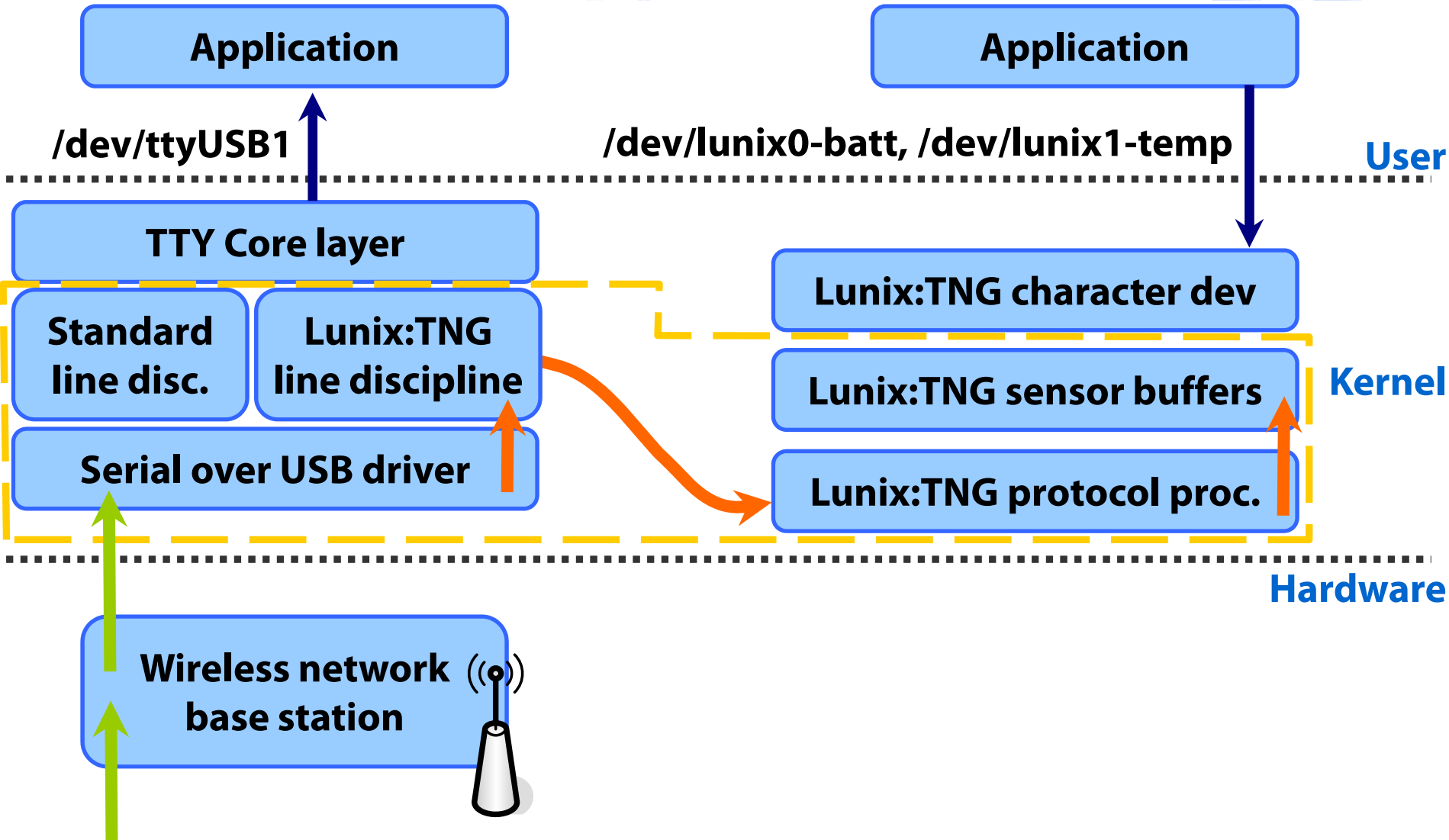
Ζητήματα Υλοποίησης (3)



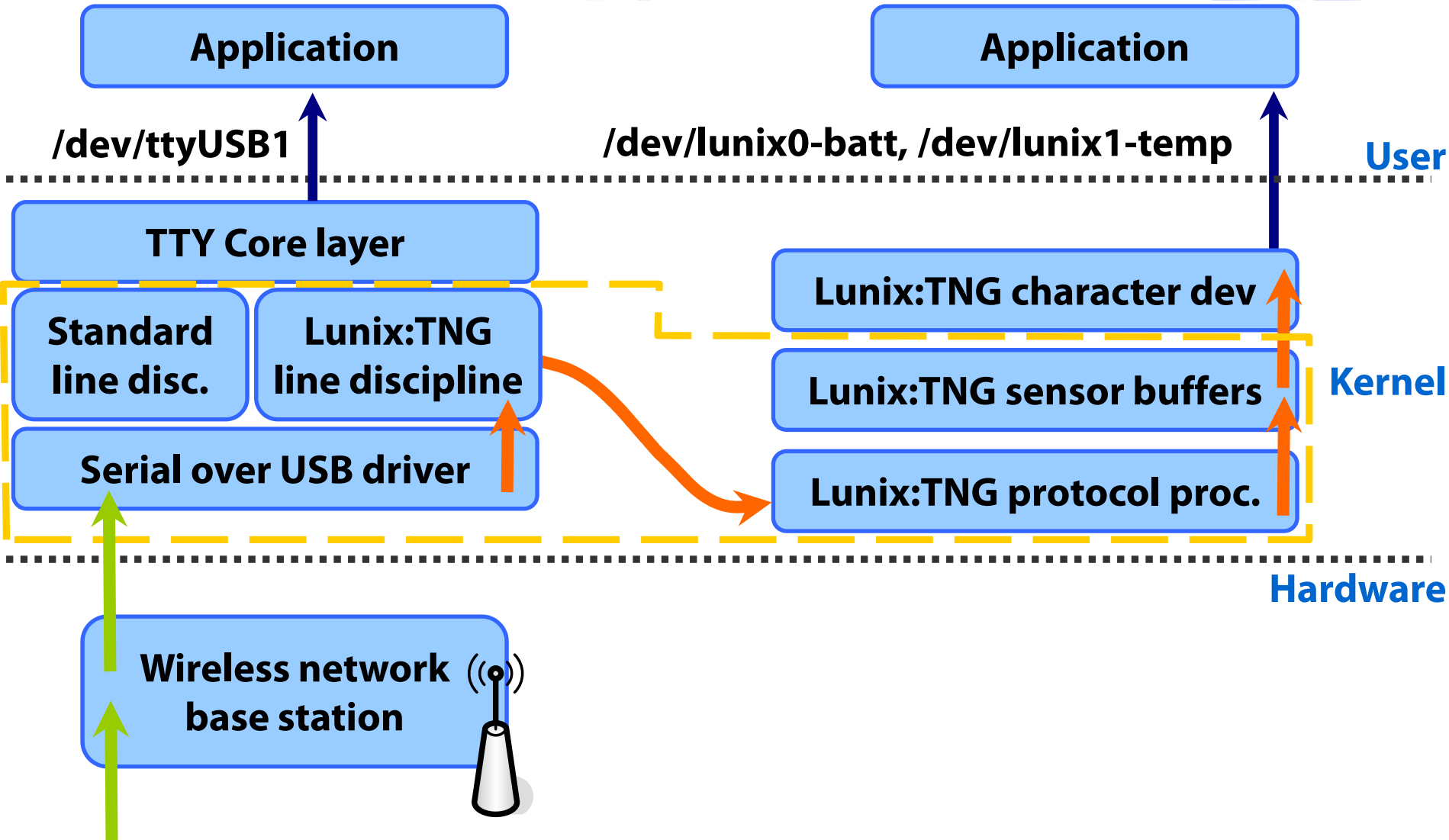
Ζητήματα Υλοποίησης (3)



Ζητήματα Υλοποίησης (3)



Ζητήματα Υλοποίησης (3)



Πρακτικά Ζητήματα



- ◆ Υλοποίηση μέσα σε εικονική μηχανή
 - ➔ root privilege σε Debian, σε μηχανή QEMU-KVM
- ◆ Από πού ξεκινάω;
 - ➔ make στον έτοιμο κώδικα, ανάγνωση του linux-sensors.c, προσθήκες στα linux-chrdev.{h,c}
 - ➔ Σας δίνεται σκελετός με σχόλια
- ◆ Kernel logging, printk, /var/log/kern.log
- ◆ Linux Cross Reference (LXR)

Έλεγχος και πιθανές επεκτάσεις

◆ Έλεγχος σωστής λειτουργίας

- ➔ Από userspace, με ταυτόχρονα **cat**
- ➔ και με άλλα εργαλεία, π.χ. **dd**

◆ Πιθανές επεκτάσεις

- ➔ Υποστήριξη `ioctl()` για raw / cooked modes
- ➔ Υποστήριξη memory-mapped I/O με `mmap()`
- ➔ Userspace πρόγραμμα για καταγραφή και παρουσίαση μετρήσεων

Ιστοσελίδα – λίστα του μαθήματος



[http://www.cslab.ece.ntua.gr/courses/
compsyslab/](http://www.cslab.ece.ntua.gr/courses/compsyslab/)

os-lab@lists.cslab.ece.ntua.gr

Βιβλιογραφία

- ◆ “Linux Device Drivers”,
3rd Edition, Jonathan
Corbet, Alessandro Rubini,
and Greg Kroah-Hartman.

<http://lwn.net/Kernel/LDD3>

