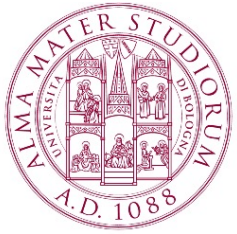


ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

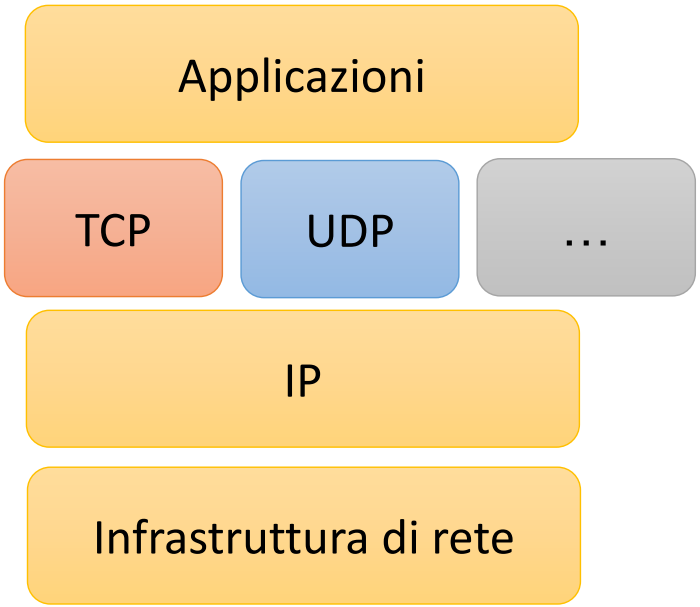
Protocolli di Trasporto

Franco CALLEGATI

Dipartimento di Informatica: Scienza e Ingegneria

Trasporto in Internet

- Architettura protocollare tradizionale di Internet:
  - Tipologia di servizio: dati
  - Due protocolli di trasporto:
    - TCP: connection oriented
    - UDP: connectionless



- Nuovi servizi multimediali:
  - Emergono problematiche di trasporto real time
  - Vengono definiti nuovi protocolli di trasporto
    - RTP, RTCP

Funzioni dello strato di trasporto

- Consente la Multiplazione:
  - Permette a più processi applicativi di utilizzare le sue funzioni di comunicazione in contemporanea
- Utilizza il numero di porta per distinguere flussi dati di applicazioni diverse
- Controlla il comportamento del canale di comunicazione end-to-end
  - L'obiettivo è quello di garantire la qualità del trasferimento dati a livello di trasporto richiesto dall'applicazione

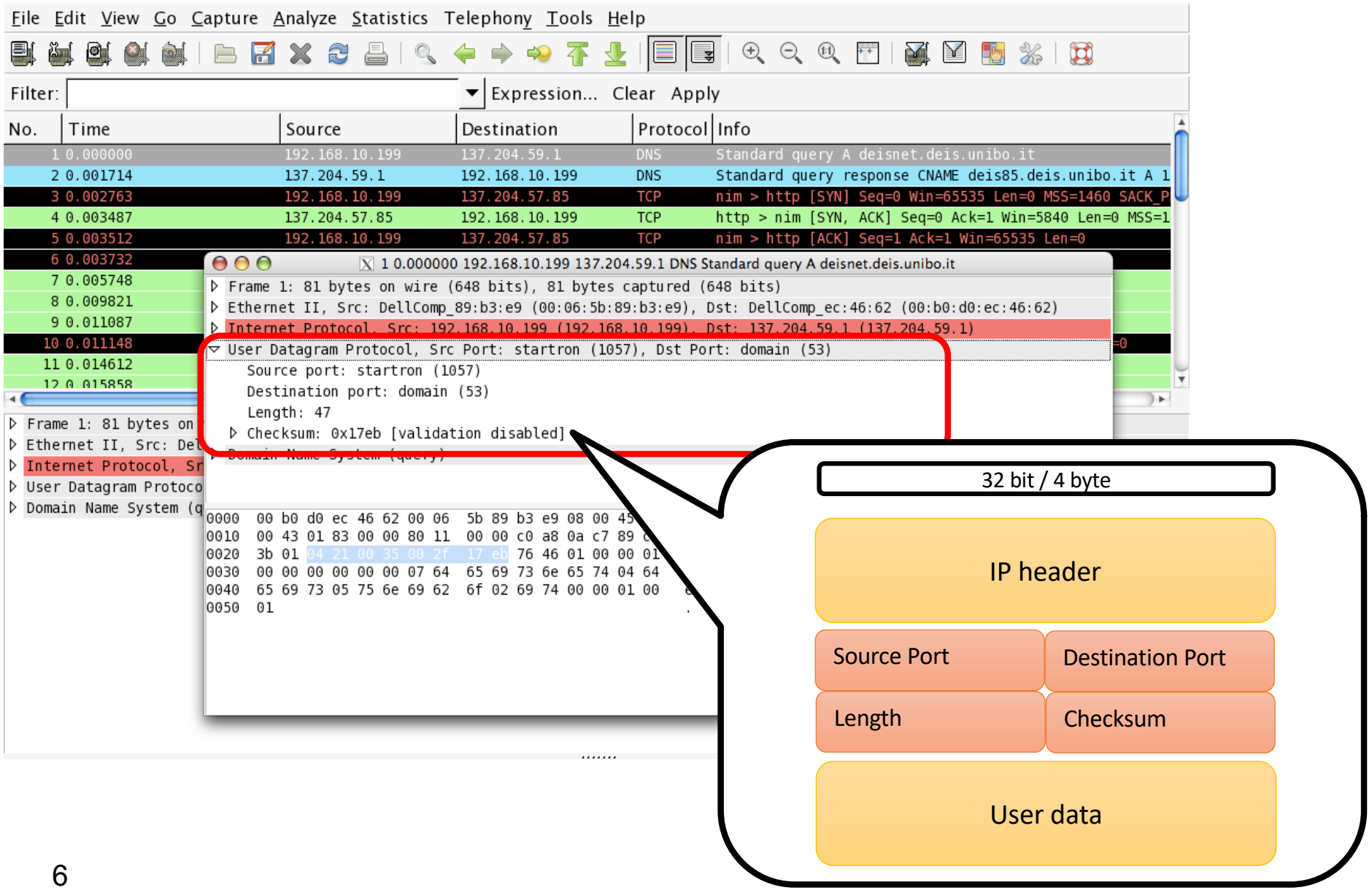
ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

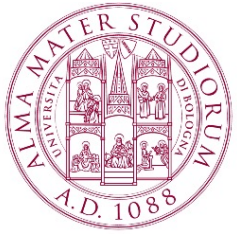
User Datagram Protocol

User Datagram Protocol (UDP)

- Protocollo “connectionless”
  - Non esiste il concetto di “connessione”
  - Ogni messaggio è indipendente da tutti gli altri
- Pensato per
  - Invio di blocchi dati di limitate dimensioni
  - Comunicazione fra applicazioni che non richiede un controllo della qualità del trasporto
    - Esempi: e-mail, DNS, …

Il messaggio UDP





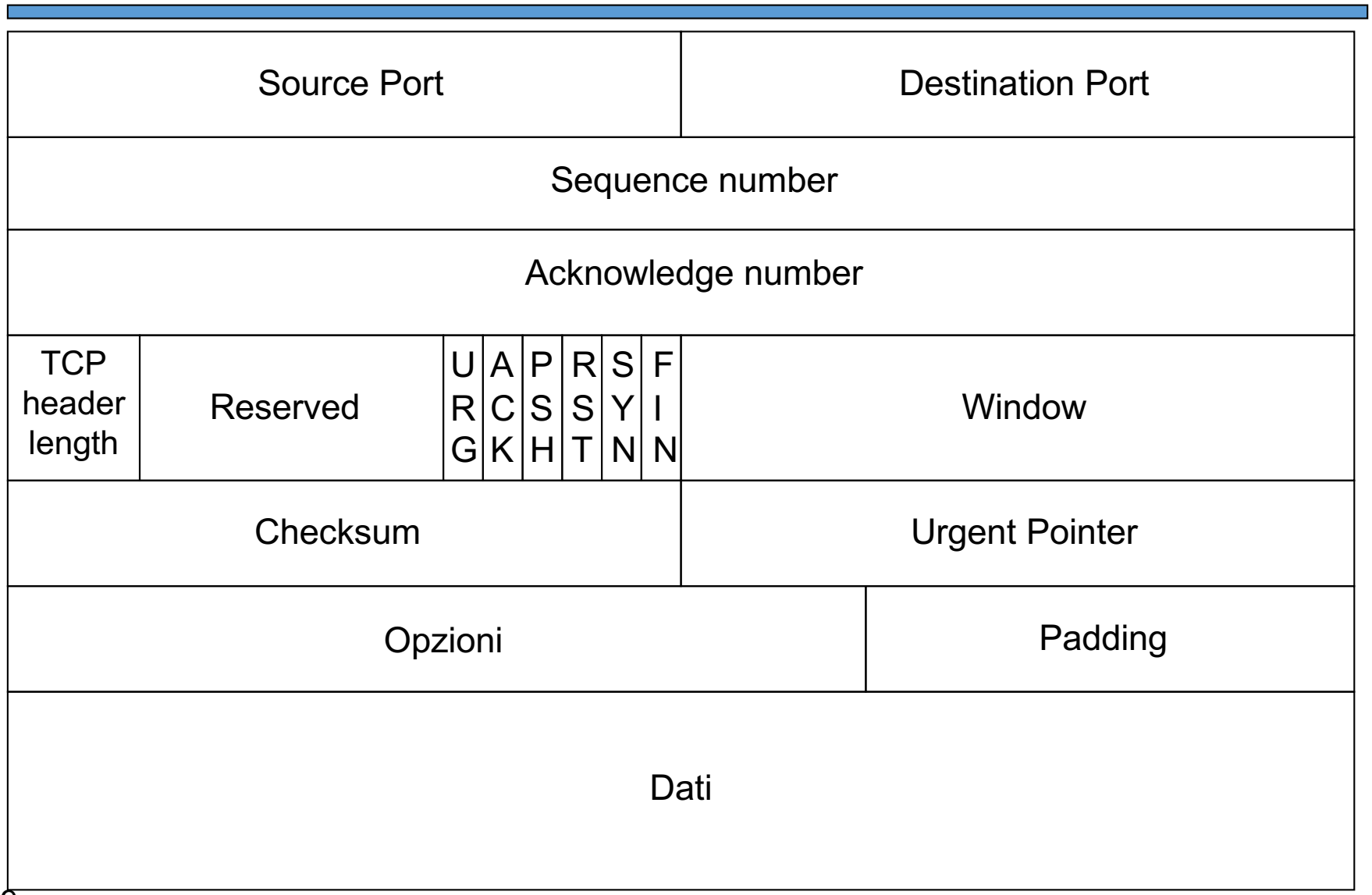
ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Transmission Control Protocol

Il segmento TCP

- TCP incapsula i dati delle applicazioni in pacchetti detti "segmenti"
- Il segmento TCP prevede
  - Un header standard di 20 byte
  - Un header variabile per negoziare delle opzioni
  - Un payload di dimensione variabile contenente i dati di applicazione
- Il segmento TCP ha una dimensione massima detta Maximum Segment Size (MSS)
  - MSS corrisponde alla massima dimensione del blocco dati di applicazione che può essere contenuto nel segmento

Formato del segmento TCP (1)



Formato del segmento TCP (2)

- **Source (Destination) port**: numero della porta sorgente (destinazione)
- **Sequence number**: numero di sequenza del primo byte del pacchetto; se è presente il bit SYN questo è il numero di sequenza iniziale su cui sincronizzarsi
- **Acknowledge number**: se il bit ACK è a 1 allora questo numero contiene il numero di sequenza del blocco di dati che il ricevitore si aspetta di ricevere
- **TCP Header Length (4 bit)**: numero di parole di 32 bit dell'intestazione TCP; indica dove iniziano i dati
- **Reserved**: sei bit riservati per uso futuro

Formato del segmento TCP (3)

- **Control bit**: sono 6 bit di controllo

  - **URG** posto a 1 se si deve considerare il campo Urgent Pointer

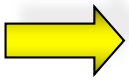
  - **ACK** posto a 1 se si deve considerare il campo Acknowledge

  - **PSH** posto a 1 serve per la funzione di push

  - **RST** posto a 1 per resettare la connessione

  - **SYN** posto a 1 per sincronizzare i numeri di sequenza

  - **FIN** posto a 1 per indicare la fine dei dati



Formato del segmento TCP (4)

- **Window**: finestra del ricevitore, cioè il numero di byte che il ricevitore è disposto a ricevere, partendo dal numero di sequenza di quello contenuto nel campo acknowledge
- **Checksum**: controllo dell'errore sul segmento
- **Urgent Pointer**: contiene puntatore a dati urgenti eventualmente presenti nel pacchetto (es. per abortire programma remoto in esecuzione), ha senso se il bit URG è posto ad 1
- **Options**: contiene opzioni per la connessione
- **Padding**: bit aggiuntivi per fare in modo che l'intestazione sia multipla di 32 bit

Dimensioni del segmento TCP

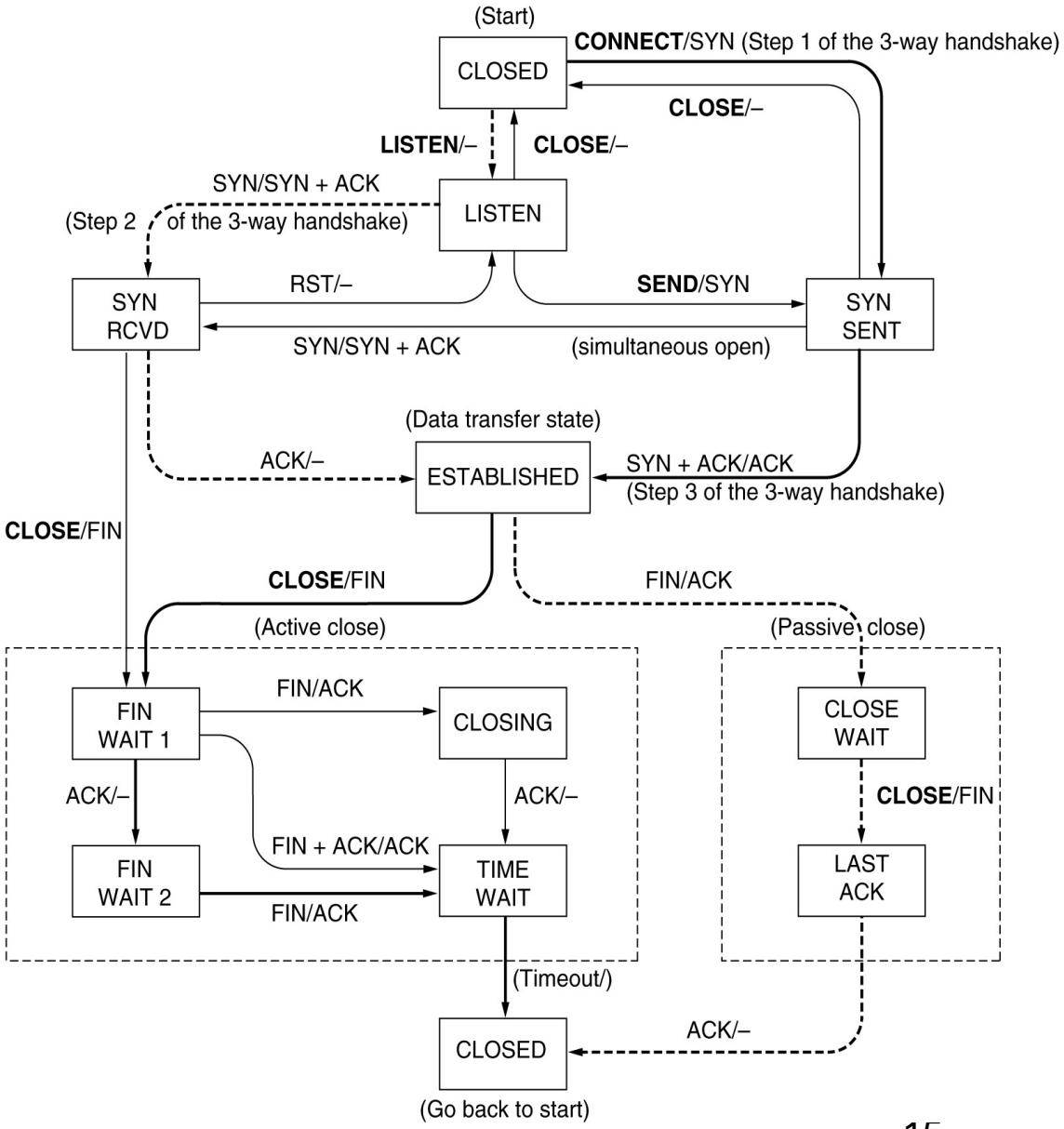
- MSS deve
  - Essere inferiore alla massima dimensione del payload IP meno un header TCP
    - 2^{16} = 65535 – 20 – 20 = 65495 byte
  - Rispettare i limiti imposti ai pacchetti dalle reti che deve attraversare e che hanno una Maximum Trasfer Unit (MTU)
    - Un tipico valore per MTU sono i 1500 byte imposti da Ethernet
- MSS dipende dall'implementazione
  - Normalmente è configurabile
- In generale non è possibile sapere la MTU di ogni rete intermedia che va attraversata
  - La rete ha il meccanismo per la frammentazione dei pacchetti
  - Questo può condurre a inefficienza, soprattutto in caso di una grande quantità di dati da trasmettere su una connessione
  - È stato definito un algoritmo detto "Path MTU discovery" (RFC 1191) basato su ICMP

Checksum

- Viene calcolato applicando Internet Checksum a
  - Pseudo-header (psedo-intestazione)
    - Indirizzi IP sorgente e destinatario
    - Protocol
    - Lunghezza in byte del segmento TCP (payload IP)
      - Non viene trasmessa ma viene calcolata in trasmissione e in ricezione
  - Intestazione TCP
    - Con campo checksum posto a 0
  - Dati del segmento TCP
    - Se il numero di byte è dispari viene aggiunto un byte di padding con tutti i bit a 0
    - Il padding non viene trasmesso

La macchina a stati finiti del TCP

- Linee tratteggiate
  - Azioni tipiche di un server
- Linee nere
  - Azioni tipiche di un client
- Linee chiare
  - Eventi inusuali
- Transizioni
  - Causa/effetto



Da A.S. Tanenbaum, “Reti di Calcolatori”

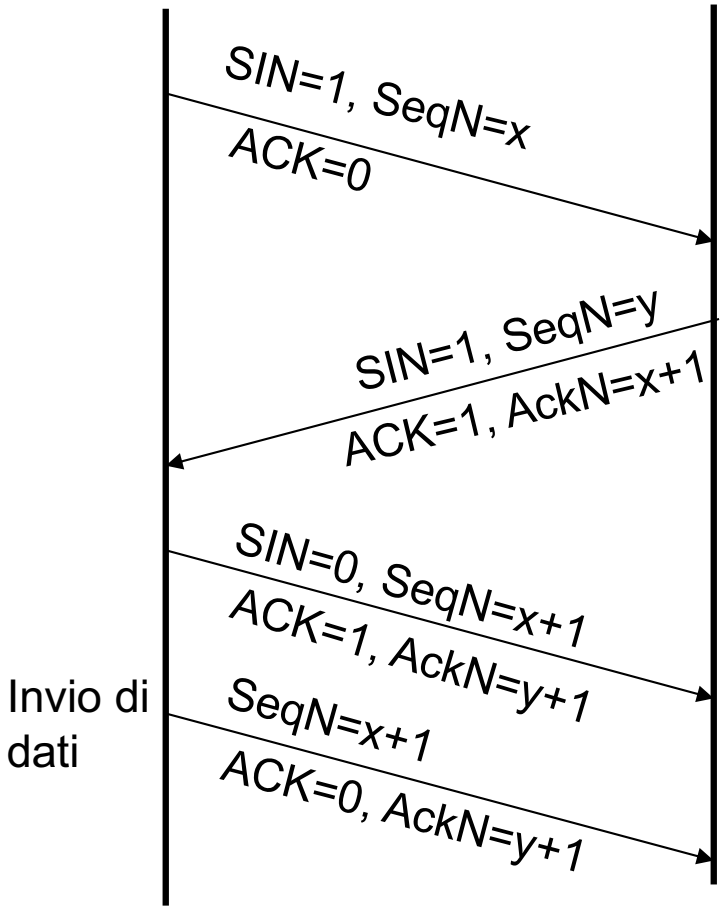
Definizioni

- **Stato:** Le condizioni che descrivono il software del protocollo in un particolare calcolatore in un determinato istante.
- **Transizione:** Il passaggio da uno stato ad un altro.
- **Evento:** Qualunque cosa che provochi una transizione di stato per il protocollo.
- **Azione:** Qualcosa che il software del protocollo fa in un dispositivo come risposta ad un evento prima di effettuare un transizione di stato

Dialogo su rete inaffidabile

- Se il mezzo di comunicazione è inaffidabile risulta sostanzialmente impossibile avere uno scambio di informazioni con conferma certa
  - Problema logico delle 3 armate
  - A invia un messaggio e B lo conferma
  - Se A non riceve la conferma non può sapere se B abbia ricevuto il messaggio o meno
    - Perdita del messaggio o della conferma?
  - Il ragionamento si può proseguire sulla conferma della conferma ecc.
- È necessario decidere dove fermarsi per raggiungere un determinato grado di affidabilità

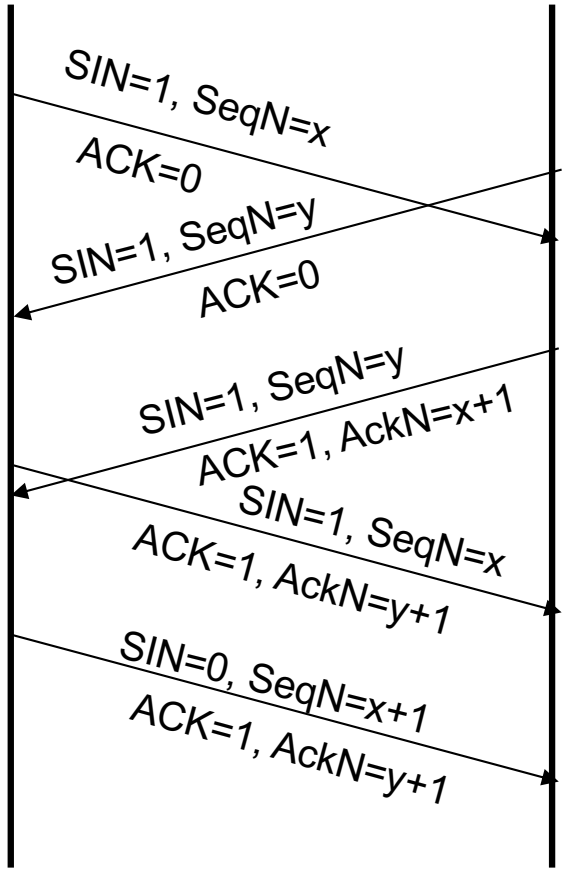
Apertura della connessione TCP

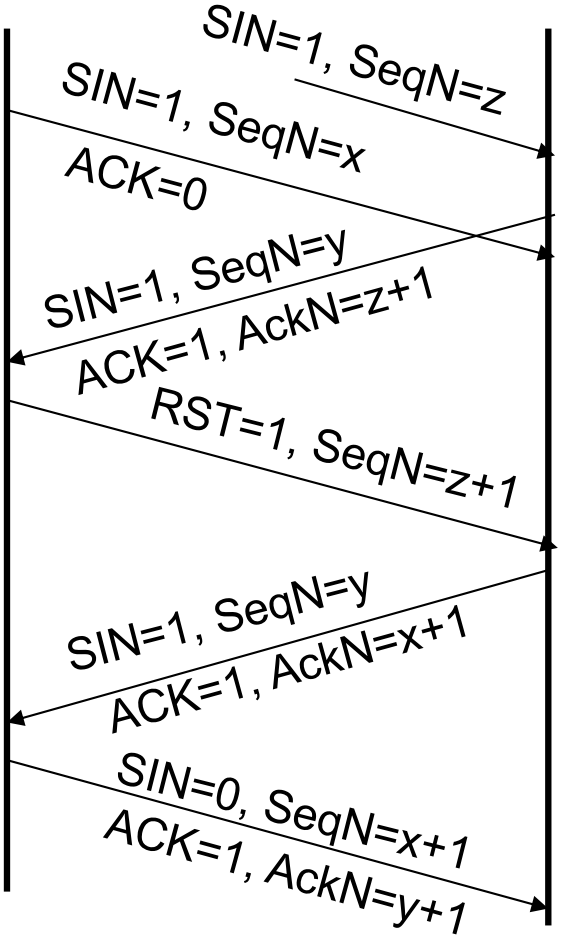


- L'apertura della connessione è critica
  - I segmenti di segnalazione possono essere persi, duplicati e ritardati
- Three ways handshake
  - Si è dimostrato molto robusto alla prova dei fatti
- Utilizza sinergicamente i bit di flag e quelli di numerazione
  - Si noti che il primo pacchetto dati ha numero di sequenza uguale all'ACK precedente (ACK non occupa spazio di numerazione)

Caratteristiche del TWH

- Il three-ways handshake
  - resiste alla instaurazione contemporanea di due connessioni
  - ignora pacchetti di apertura ritardatari





Il problema delle «incarnazioni»

- Connessione fra Host A e Host B
  - Host A viene riavviato
    - La connessione viene di fatto chiusa in modo errato
    - La connessione rimane attiva in Host B
- Dopo il riavvio l'applicazione vuole riprendere il dialogo e riprova ad aprire la connessione con Host B
  - Cosa accade se decide di utilizzare i medesimi numeri di porta (ossia riavviare la medesima connessione)
- Esistono a breve distanza di tempo diverse "incarnazioni" della medesima connessione logica

Ripresa dopo un problema

- Il three ways handshake per una nuova incarnazione
  - L'host B ritiene che la connessione precedente sia ancora aperta
  - L'ambiguità viene risolta

```
TCP A                                                TCP B
 1.  (CRASH)                                  (send 300,receive 100)
 2.  CLOSED                                            ESTABLISHED
 3.  SYN-SENT --> <SEQ=400><CTL=SYN>              --> (??)
 4.  (!!)     <-- <SEQ=300><ACK=100><CTL=ACK>     <-- ESTABLISHED
 5.  SYN-SENT --> <SEQ=100><CTL=RST>              --> (Abort!!)
 6.  SYN-SENT                                          CLOSED
 7.  SYN-SENT --> <SEQ=400><CTL=SYN>              -->
```

Chiusura della connessione TCP

- Soft release
  - Il TCP cerca di realizzare la chiusura ordinata della connessione, garantendo che non vadano persi dati
- Anche questo problema non può essere risolto in modo rigoroso su una rete inaffidabile
- TCP sceglie di realizzare la chiusura con modalità "simplex"
  - Le due direzioni vengono rilasciate in modo indipendente
  - Il TCP che intende terminare la trasmissione emette un segmento con FIN=1
    - Quando questa entità riceve l'Ack la direzione si considera chiusa
    - Se dopo un certo tempo non arriva l'Ack il mittente del FIN rilascia comunque la connessione
  - L'altra direzione può continuare a trasmettere dati finché non decide di chiudere

Esempio di chiusura normale

- TCP A decide di chiudere
  - Inizia la procedura inviando un segmento con FIN=1
- TCP B rileva la richiesta di chiusura
  - Procede anche lui all'invio di un segmento con FIN=1

```
TCP A                                                          TCP B
 1.  ESTABLISHED                                                    ESTABLISHED
 2.  (Close)
     FIN-WAIT-1  --> <SEQ=100><ACK=300><CTL=FIN,ACK>  --> CLOSE-WAIT
 3.  FIN-WAIT-2  <-- <SEQ=300><ACK=101><CTL=ACK>      <-- CLOSE-WAIT
 4.                                                             (Close)
     TIME-WAIT   <-- <SEQ=300><ACK=101><CTL=FIN,ACK>  <-- LAST-ACK
 5.  TIME-WAIT   --> <SEQ=101><ACK=301><CTL=ACK>      --> CLOSED
 6.  (2 MSL)
     CLOSED
```

Chiusura contemporanea

- TCP A e B decidono in contemporanea di chiudere la connessione
  - La procedura funziona correttamente anche in questo caso

```
TCP A                                                          TCP B
 1.  ESTABLISHED                                                ESTABLISHED
 2.  (Close)                                                    (Close)
     FIN-WAIT-1  --> <SEQ=100><ACK=300><CTL=FIN,ACK>  ...      FIN-WAIT-1
                 <-- <SEQ=300><ACK=100><CTL=FIN,ACK>  <--
                 ... <SEQ=100><ACK=300><CTL=FIN,ACK>  -->
 3.  CLOSING     --> <SEQ=101><ACK=301><CTL=ACK>      ...      CLOSING
                 <-- <SEQ=301><ACK=101><CTL=ACK>      <--
                 ... <SEQ=101><ACK=301><CTL=ACK>      -->
 4.  TIME-WAIT                                                  TIME-WAIT
     (2 MSL)                                                    (2 MSL)
     CLOSED                                                     CLOSED
```

Svolgimento del dialogo

- Protocollo ARQ per rendere affidabile il dialogo
- Rispetto ai protocolli di linea TCP affronta un problema molto più complesso
  - Le caratteristiche dei ricevitori possono essere estramemente variabili
  - I segmenti sono trasmessi utilizzando una rete connectionless e quindi non è garantito l'arrivo in sequenza
  - I percorsi in rete e le condizioni di congestione possono variare e quindi il ritardo di propagazione non è costante
  - La banda del canale dipende dal percorso

Lo stato ESTABLISHED

- Nello stato si trasferiscono i dati utilizzando il protocollo ARQ
  - Si numerano sequenzialmente i segmenti
  - Si conferma la corretta ricezione dei segmenti
  - Il recupero degli errori avviene tramite ritrasmissione
  - Il meccanismo di ritrasmissione è una sorta di Go-back-N modificato

Numerazione in TCP

- Per avere la massima flessibilità si sceglie di assegnare un numero non ai segmenti ma ai singoli byte trasportati nei segmenti
  - I dati trasportati sono pensati come un unico flusso (stream) di byte (byte stream)
  - Si comincia a numerare da un numero x scelto all'atto dell'apertura della connessione
    - Il campo Seq. number numera il primo byte del segmento
- La conferma di avvenuta ricezione viene data mettendo nel campo Ack. Number il numero del byte successivo all'ultimo ricevuto
  - primo byte che ci si aspetta di ricevere

Numerazione duplicata

- Possono facilmente aversi segmenti ritardati o duplicati
  - All'istante t_0 viene inviato il segmento S_0 con numero di sequenza X
  - S_0 viene duplicato nella rete
    - Una copia viene correttamente ricevuta e confermata
    - Una copia viene ritardata rispetto alle altre
  - La trasmissione continua
    - Si esaurisce lo spazio di numerazione e quindi si riutilizzano numeri già usati
    - All'istante $t_k > t_0$ viene inviato il segmento S_k che ha anch'esso numero di sequenza X
  - La copia ritardata di S_0 arriva poco prima di S_k
    - viene interpretata come segmento valido

Maximum Segment Lifetime

- I numeri di sequenza possono essere riutilizzati?
  - Solo se si è sicuri che non esistano più in rete vecchi segmenti numerati con tali numeri
- Lo spazio di numerazione finito rende necessario limitare il tempo di vita dei segmenti
- Il massimo tempo di vita dei segmenti (Maximum Segment Lifetime o MSL) deve essere noto
  - MSL = 2 min (RFC 793)
    - Su di un collegamento a 2 Megabits/sec servono 4.5 ore per esaurire lo spazio di numerazione di 2**32 ottetti
    - Su di un collegamento a 100 Megabits/sec servono 5.4 minuti per esaurire lo spazio di numerazione di 2**32 ottetti
    - Cosa accade per reti con velocità del Gbit/s e oltre?

Inizializzazione della sequenza

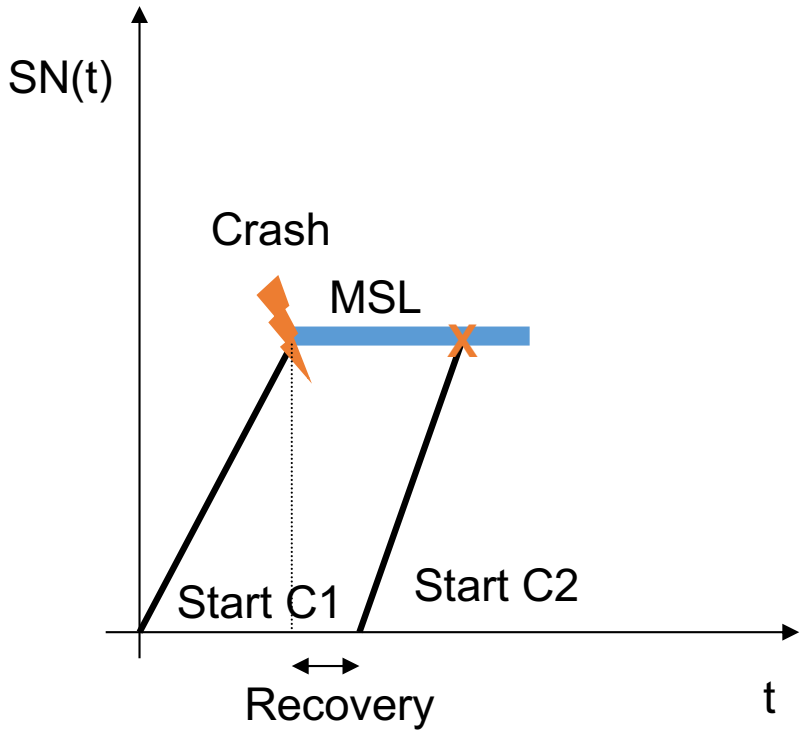
- All'apertura della connessione si deve scegliere il numero di sequenza iniziale (Initial Sequence Number o ISN)
  - Numero prefissato uguale per tutti
  - Numero puramente casuale
  - Numero legato al valore di un contatore
- ISN
  - Deve garantire che non ci sia duplicazione nell'uso dei numeri di sequenza
  - Qualora non sia prefissato e costante deve essere concordato fra i due host che aprono la connessione

Se qualcosa va male

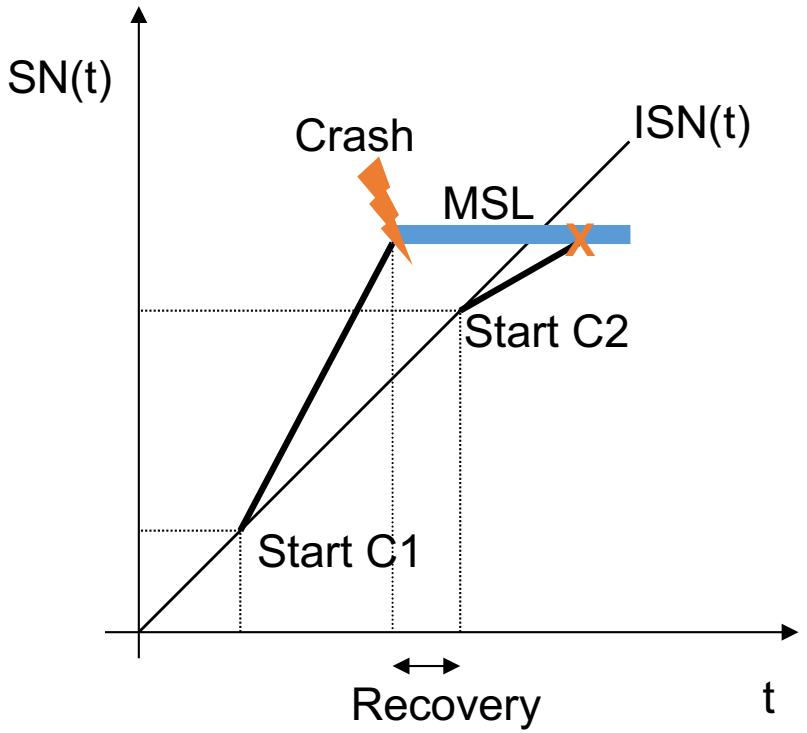
- Un host viene riavviato a causa di un problema?
  - Vengono ricreate nuove "*incarnazioni*" di vecchie connessioni
  - Vengono scelti nuovi ISN
  - Una nuova incarnazione può finire per usare numeri già utilizzati dall'incarnazione precedente
    - Segmenti ritardati della prima incarnazione possono essere ricevuti dalla nuova incarnazione con numero di sequenza apparentemente corretto

Esempio

- ISN sempre uguale
  - ISN = 0



- ISN(t) = t
  - ISN uguale al valore di un contatore



ISN nella RFC 793

- ISN è funzione del tempo utilizzando un sistema di conteggio
  - Contatore a 32 bit
  - Incrementato ogni 4 μsec
    - Il contatore ripete la sequenza ogni 2^{32} 4 μsec = 4.77 h

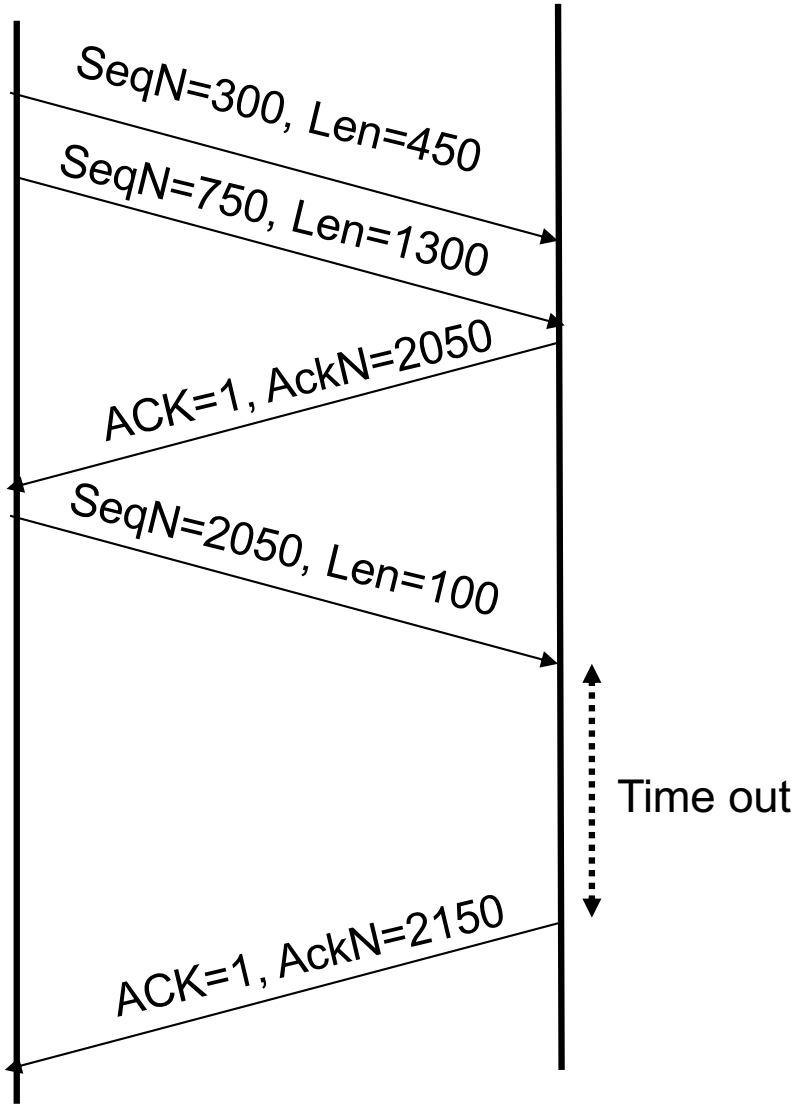
- TCP quiet time
  - Dopo un qualunque riavvio un host attende almeno un MSL prima di riaprire le connessioni TCP

Messaggi di conferma (ACK)

- Gli Ack sono cumulativi
- In piggybacking
  - La conferma ha la forma di un normale messaggio TCP con il flag ACK=1
  - Può contenere dati oppure no
  - Se non contiene dati ne risulta un datagramma IP di 40 byte
    - 20 byte = min. header IP + 20 byte = min. header TCP
- Di default la conferma è esplicita
  - Il ricevitore trasmette un ACK per ogni segmento ricevuto
- ACK ritardati
  - Al momento della ricezione corretta di un segmento il ricevitore può inviare subito un ACK oppure ritardarlo
    - L'obiettivo è quello di minimizzare il numero di ACK
    - Se si ritarda troppo possono scattare i time-out

ACK ritardati

- Un ACK e' ritardato fino a che
  - è stato ricevuto un ulteriore pacchetto
  - Scatta un time out
    - Uguale a 200 ms nelle principali implementazioni
- Si riduce il traffico di ack
- Normalmente si produce un ACK ogni due segmenti



In ricezione

- Il ricevitore ha ricevuto fino a SeqN = N
  - Attende un segmento con SeqN = N+1 mod M
  - Riceve un segmento con SeqN = X ≠ N+1 mod M
    - Se X è precedente ad N il segmento viene considerato un duplicato ritardato e viene scartato
    - Se X è successivo ad N il segmento è fuori sequenza (manca qualcosa)
  - Cosa può essere accaduto?
    - Uno o più segmenti sono andati persi
    - Un segmento trasmesso dopo un altro lo ha superato a causa dei diversi percorsi possibili e dei ritardi variabili in rete
  - Cosa fare?
    - Il ricevitore memorizza il segmento se X è entro W_R
    - Ritrasmette l'ultima conferma inviata (ACK duplicato)
  - Quando riceve seqN = N a completamento della sequenza conferma ackN = X+1

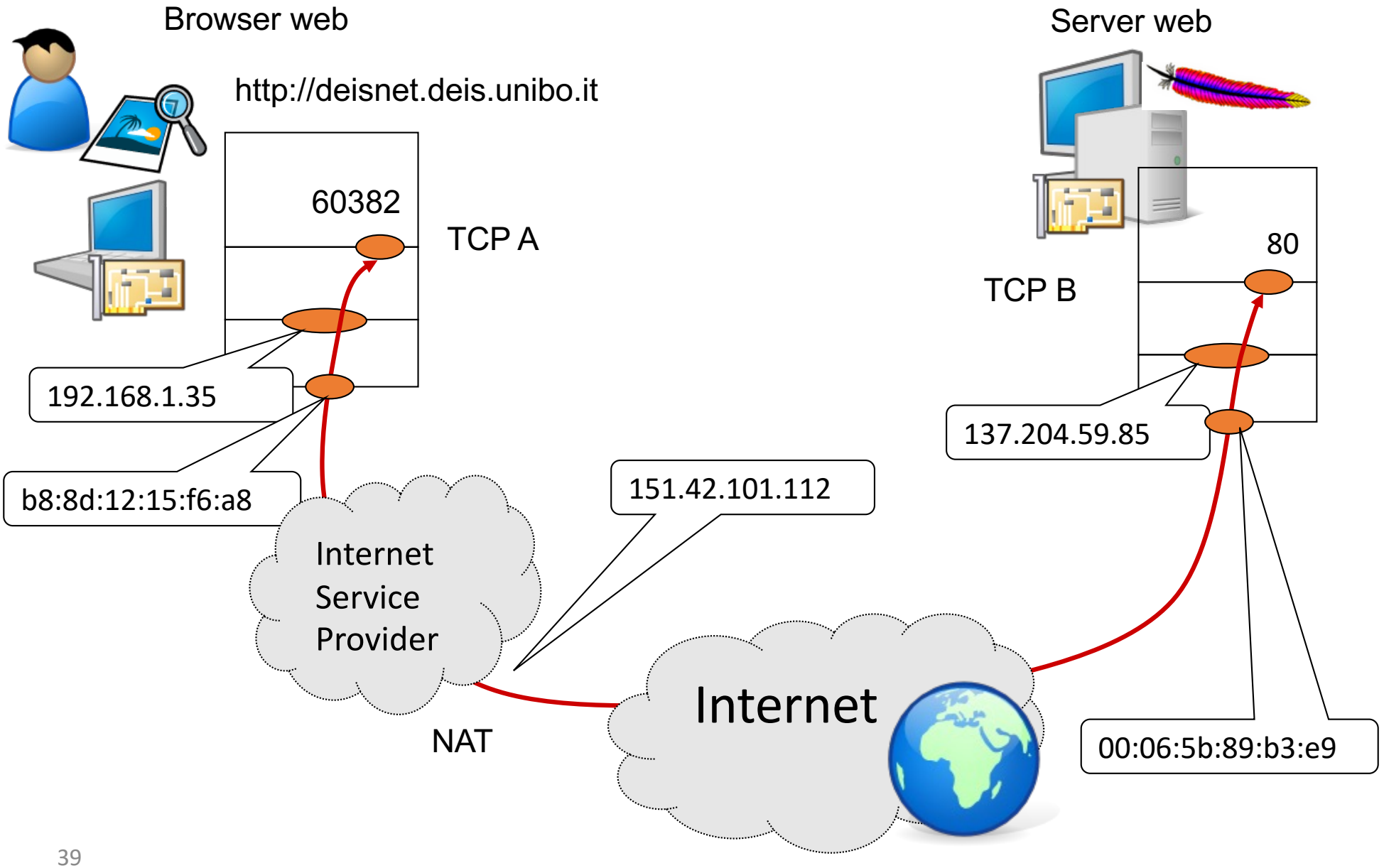
In trasmissione

- Il trasmettitore invia il segmento seqN = N
  - Se riceve un ACK con ackN = N+1 toglie il segmento dalla memoria e fa scorrere la finestra di trasmissione
  - Se non riceve ackN = N+1 allo scadere di RTO ritrasmette il segmento
  - Ignora eventuali ACK duplicati

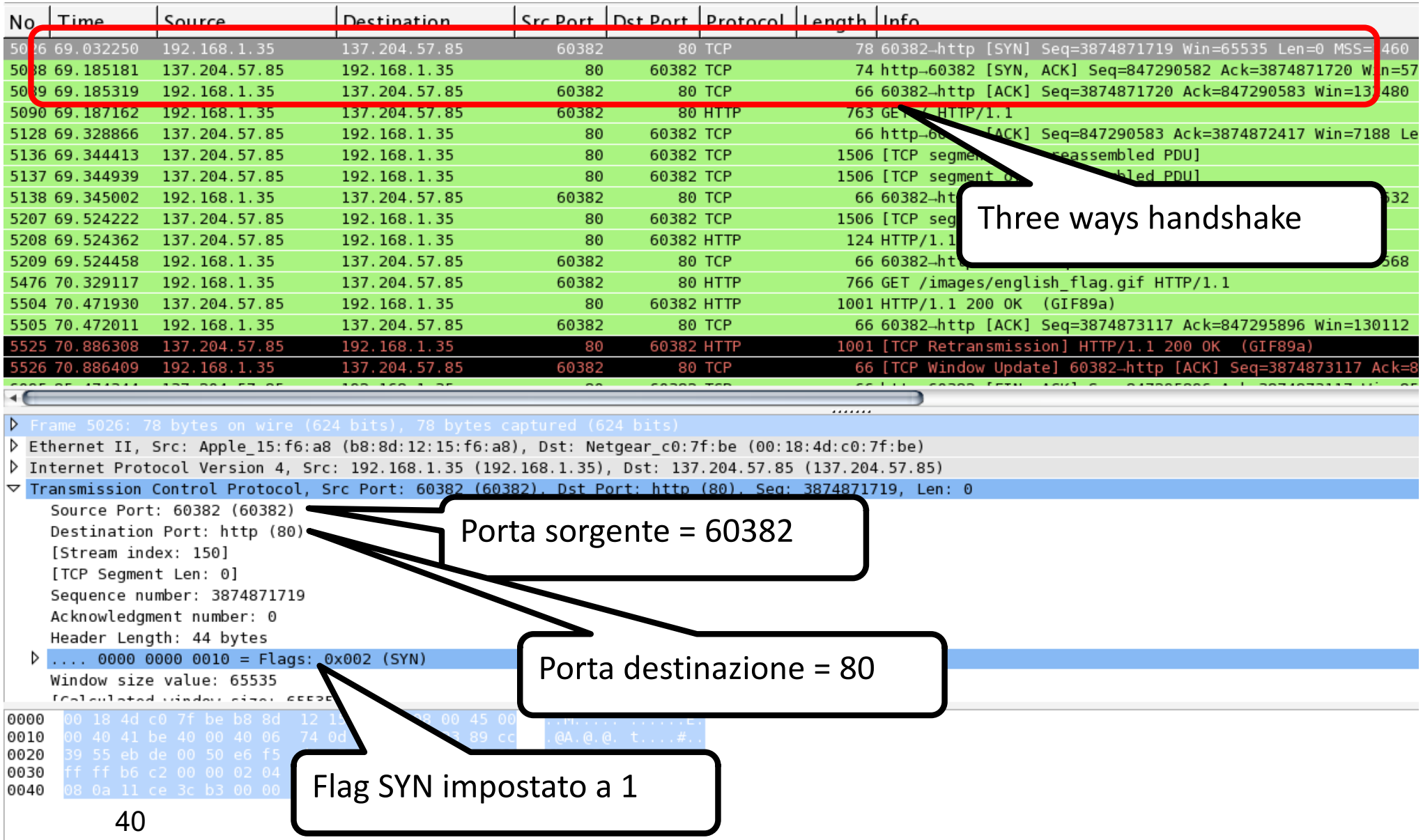
ACK duplicati

- Il TCP ricevente ritrasmette l'ACK per l'ultimo segmento ricevuto nella corretta sequenza generando un ACK duplicato (duplicate ACK)
  - Le implementazioni classiche di TCP ignorano gli ACK duplicati
  - Le implementazioni recenti prendono specifiche azioni se ricevono dei "duplicate ACK"

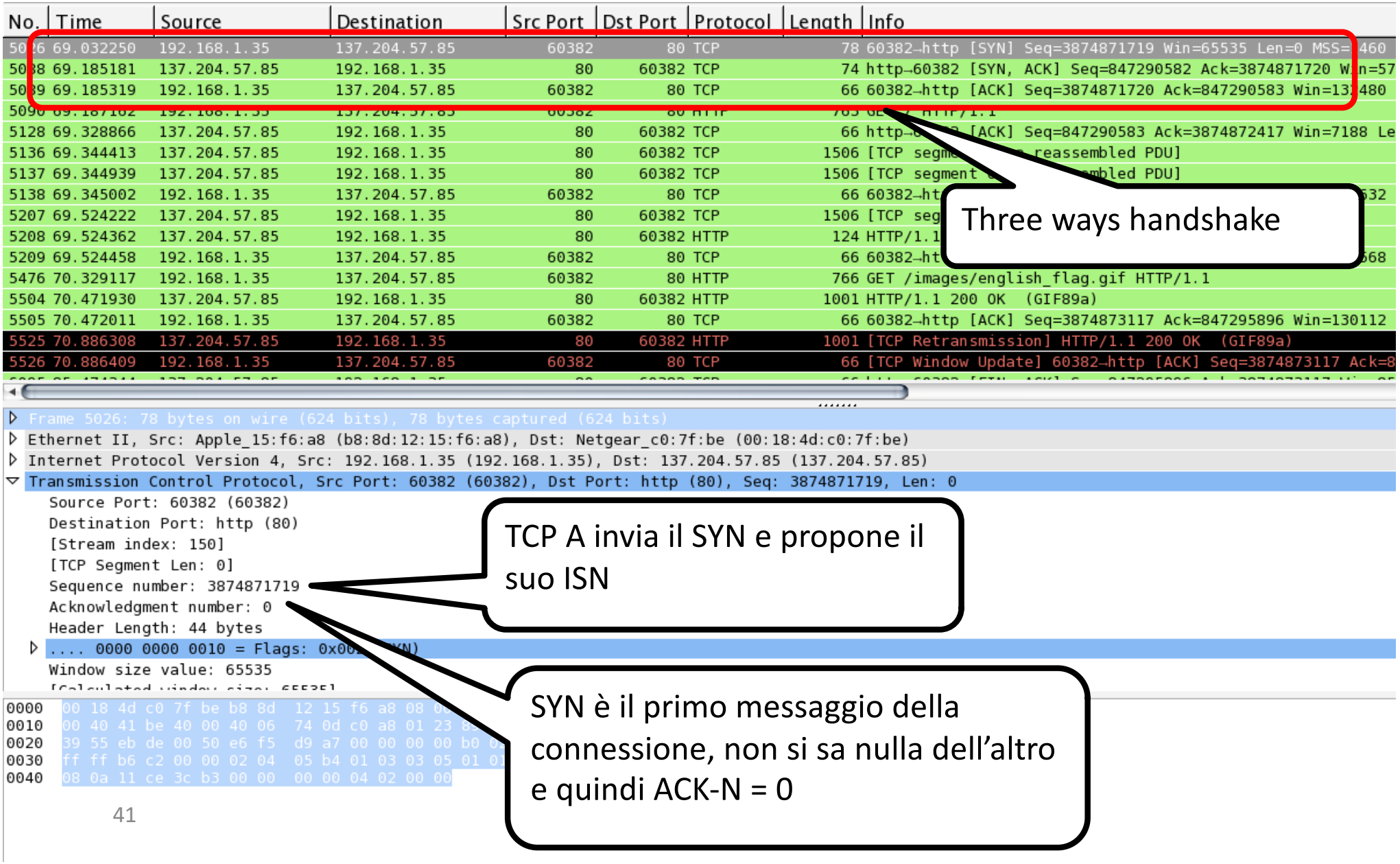
Topologia e indirizzi



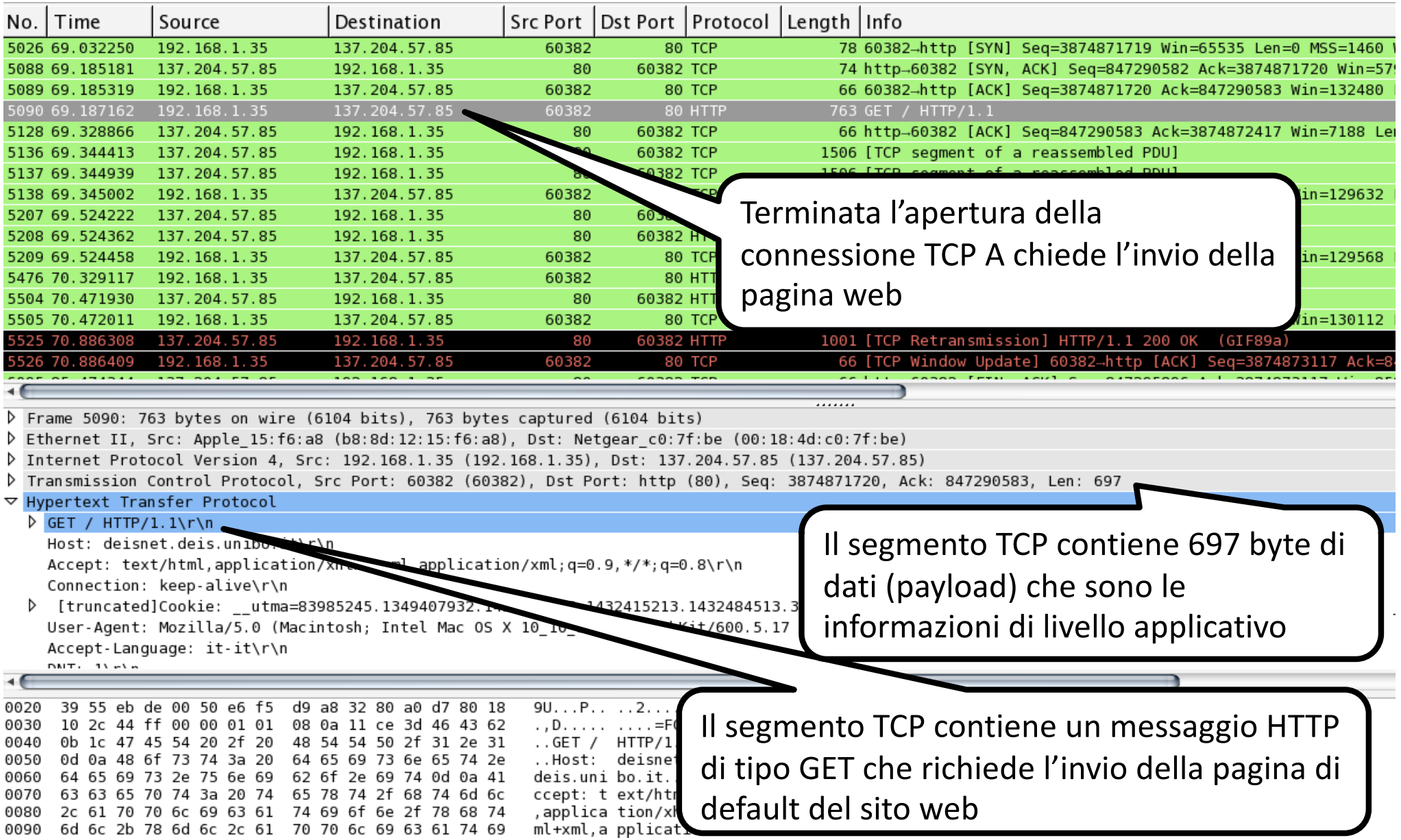
Apertura: lato client – porte e flag



Apertura: lato client - ISN



Invio richiesta HTTP



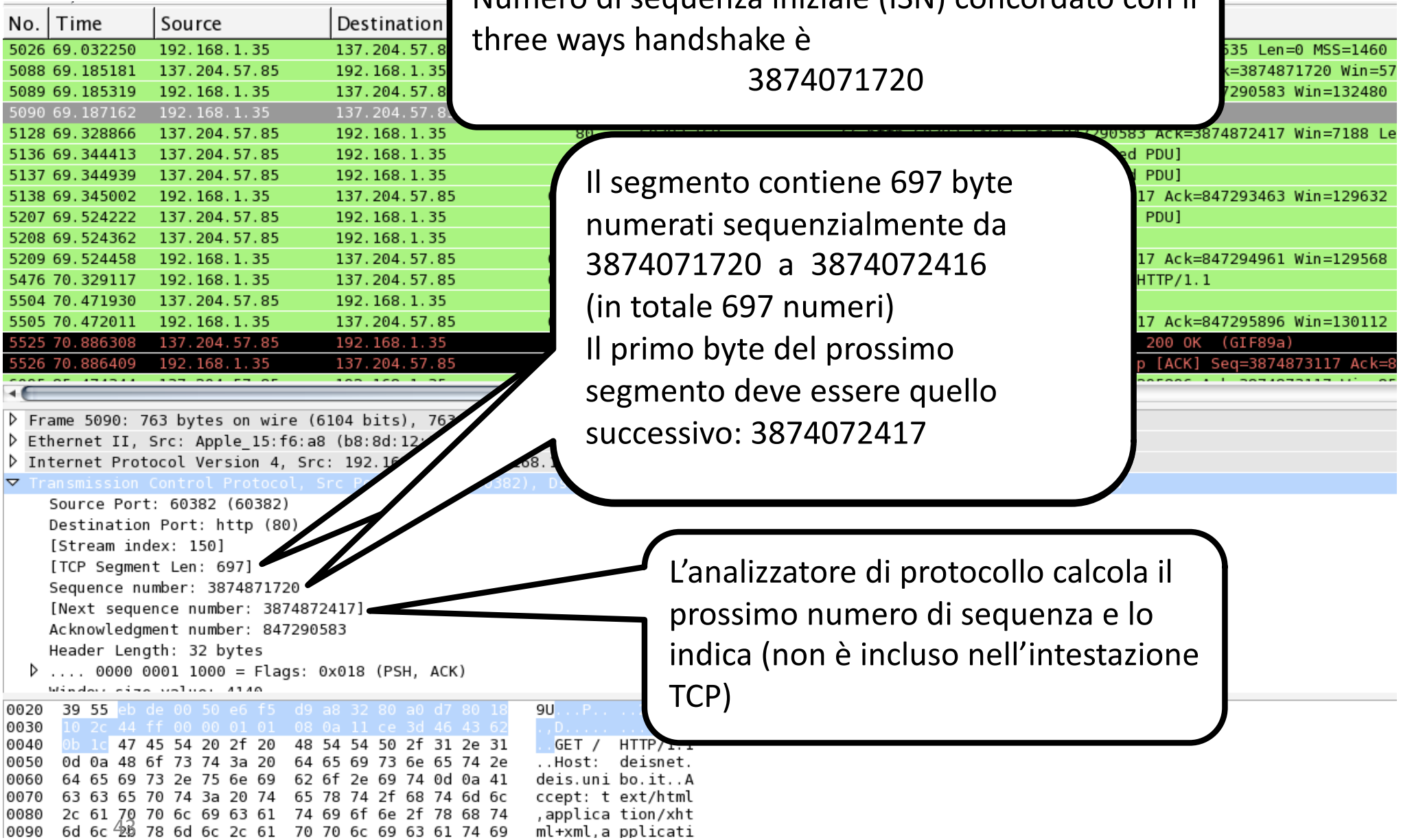
Terminata l'apertura della connessione TCP A chiede l'invio della pagina web

Il segmento TCP contiene 697 byte di dati (payload) che sono le informazioni di livello applicativo

Il segmento TCP contiene un messaggio HTTP di tipo GET che richiede l'invio della pagina di default del sito web

Invio richiesta HTTP

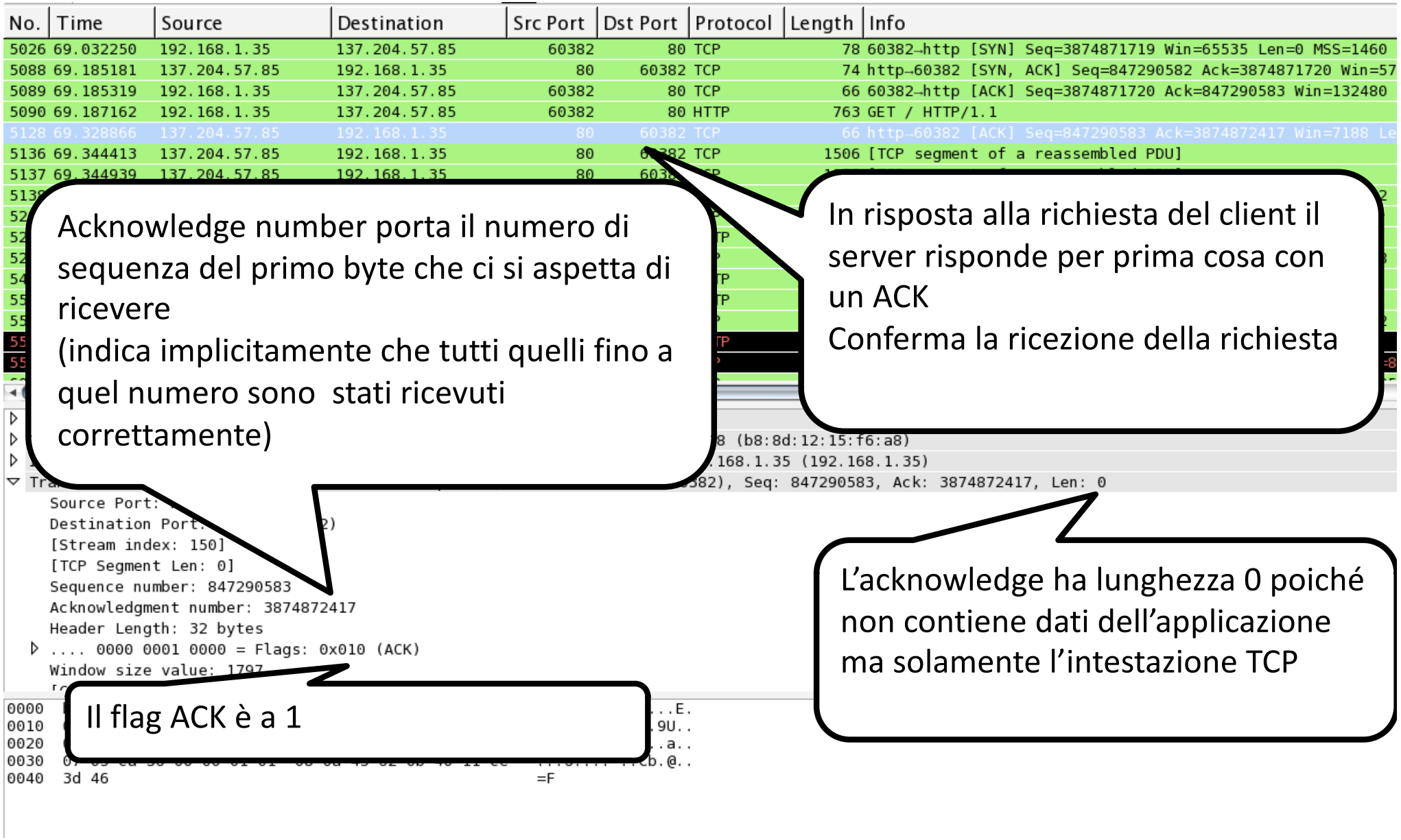
Numero di sequenza iniziale (ISN) concordato con il three ways handshake è
3874071720



Il segmento contiene 697 byte numerati sequenzialmente da 3874071720 a 3874072416 (in totale 697 numeri)
Il primo byte del prossimo segmento deve essere quello successivo: 3874072417

L'analizzatore di protocollo calcola il prossimo numero di sequenza e lo indica (non è incluso nell'intestazione TCP)

Il primo ACK



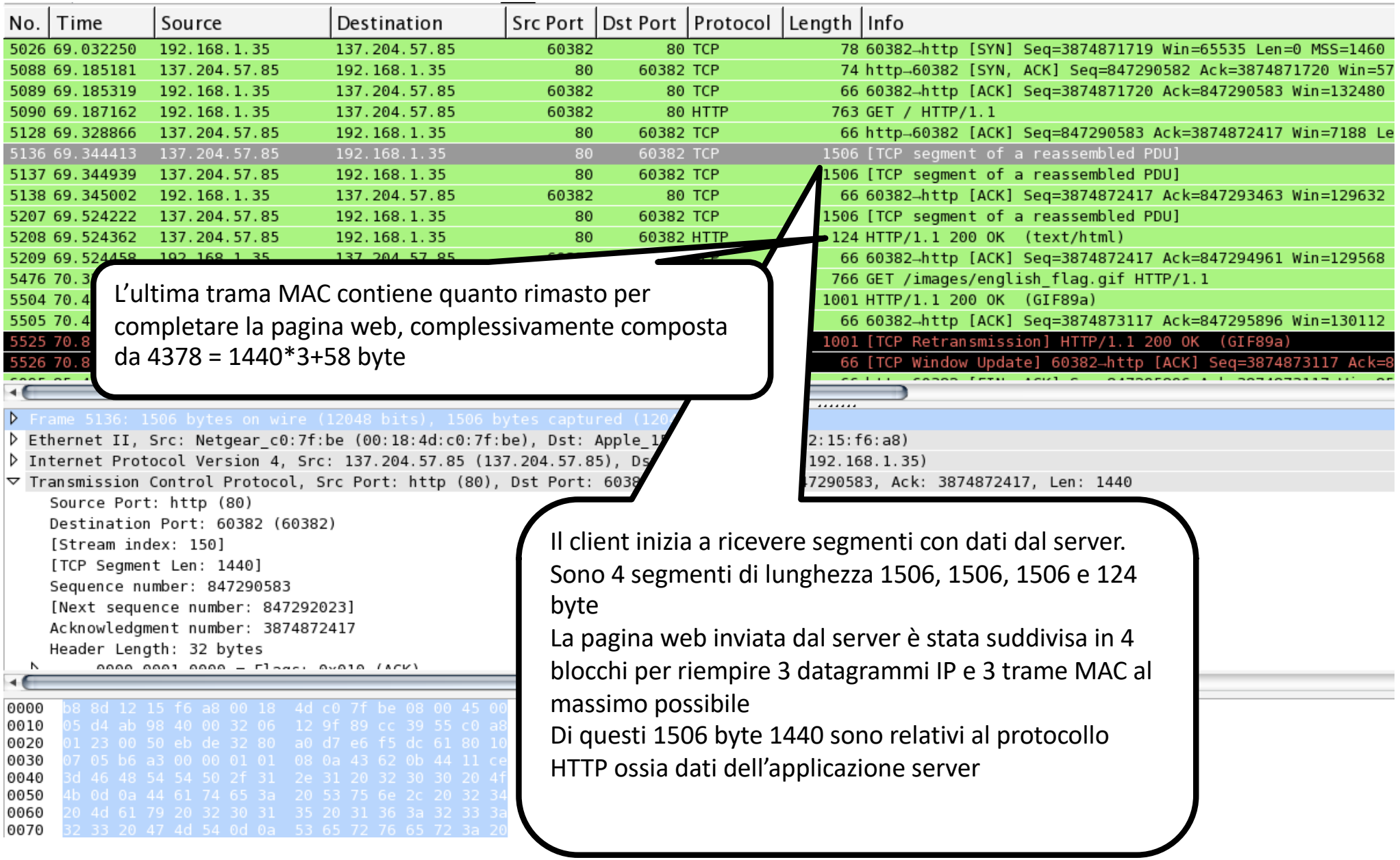
Acknowledge number porta il numero di sequenza del primo byte che ci si aspetta di ricevere
(indica implicitamente che tutti quelli fino a quel numero sono stati ricevuti correttamente)

In risposta alla richiesta del client il server risponde per prima cosa con un ACK
Conferma la ricezione della richiesta

L'acknowledge ha lunghezza 0 poiché non contiene dati dell'applicazione ma solamente l'intestazione TCP

Il flag ACK è a 1

La pagina web



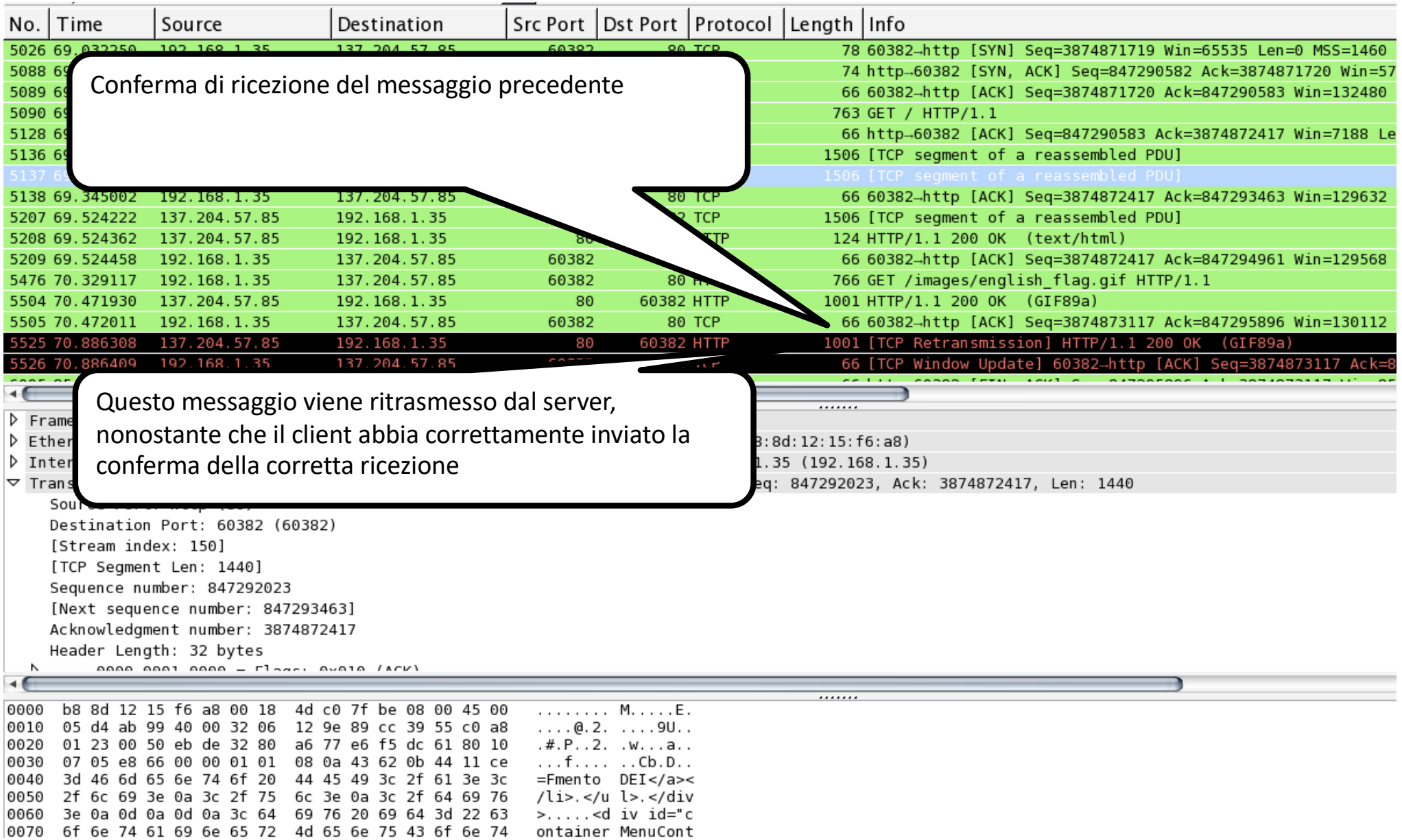
L'ultima trama MAC contiene quanto rimasto per completare la pagina web, complessivamente composta da 4378 = 1440*3+58 byte

Il client inizia a ricevere segmenti con dati dal server. Sono 4 segmenti di lunghezza 1506, 1506, 1506 e 124 byte

La pagina web inviata dal server è stata suddivisa in 4 blocchi per riempire 3 datagrammi IP e 3 trame MAC al massimo possibile

Di questi 1506 byte 1440 sono relativi al protocollo HTTP ossia dati dell'applicazione server

Ritrasmissione: lato client



Lato server

No.	Time	Source	Destination	Src Port	Dst Port	Protocol	Length	Info
1883	54.742790	151.42.79.161	137.204.57.85	60382	80	TCP	78	60382→http [SYN] Seq=3874871719 Win=65535 Len=0 MSS=1452
1884	54.742816	137.204.57.85	151.42.79.161	80	60382	TCP	74	http→60382 [SYN, ACK] Seq=847290582 Ack=3874871720 Win=57
1892	54.877566	151.42.79.161	137.204.57.85	60382	80	TCP	66	60382→http [ACK] Seq=3874871720 Ack=847290583 Win=132480
1893	54.886652	151.42.79.161	137.204.57.85	60382	80	HTTP	763	GET / HTTP/1.1
1894	54.886673	137.204.57.85	151.42.79.161	80	60382	TCP	66	http→60382 [ACK] Seq=847290583 Ack=3874872417 Win=7188 Le
1897	54.899808	137.204.57.85	151.42.79.161	80	60382	TCP	1506	[TCP segment of a reassembled PDU]
1898	54.899843	137.204.57.85	151.42.79.161	80	60382	TCP	1506	[TCP segment of a reassembled PDU]
1903	55.080073	151.42.79.161	137.204.57.85	60382	80	TCP	66	60382→http [ACK] Seq=3874872417 Ack=847293463 Win=129632
1904	55.080095	137.204.57.85	151.42.79.161	80	60382	TCP	1506	[TCP segment of a reassembled PDU]
1905	55.080103	137.204.57.85	151.42.79.161	80	60382	HTTP	124	HTTP/1.1 200 OK (text/html)
1918	55.217302	151.42.79.161	137.204.57.85	60382	80	TCP	66	60382→http [ACK] Seq=3874872417 Ack=847294961 Win=129568
1980	56.028035	151.42.79.161	137.204.57.85	60382	80	HTTP	766	GET /images/english_flag.gif HTTP/1.1
1981	56.028436	137.204.57.85	151.42.79.161	80	60382	HTTP	1001	HTTP/1.1 200 OK (GIF89a)
2012	56.442888	137.204.57.85	151.42.79.161	80	60382	HTTP	1001	[TCP Retransmission] HTTP/1.1 200 OK (GIF89a)
2017	56.580028	151.42.79.161	137.204.57.85	60382	80	TCP	66	60382→http [ACK] Seq=3874873117 Ack=847295896 Win=131072
2423	71.032219	137.204.57.85	151.42.79.161	80	60382	TCP	66	http→60382 [FIN, ACK] Seq=847295896 Ack=3874873117 Win=85

```
▷ Frame 1883: 78 bytes on wire (624 bits), 78 bytes captured (624 bits)
▷ Ethernet II, Src: Cisco_8f:21:47 (00:16:47:8f:21:47), Dst: Intel_5e:3f:1c (00:0e:0c:5e:3f:1c)
▷ Internet Protocol Version 4, Src: 151.42.79.161 (151.42.79.161), Dst: 137.204.57.85 (137.204.57.85)
▽ Transmission Control Protocol, Src Port: 60382 (60382), Dst Port: http (80), Seq: 3874871719, Len: 0
    Source Port: 60382 (60382)
    Destination Port: http (80)
    [Stream index: 44]
    [TCP Segment Len: 0]
    Sequence number: 3874871719
    Acknowledgment number: 0
    Header Length: 44 bytes
  ▷ .... 0000 0000 0010 = Flags: 0x002 (SYN)
    Window size value: 65535
```

```
0000  00 0e 0c 5e 3f 1c 00 16  47 8f 21 47 08 00 45 00   ...^?... G.!G..E.
0010  00 40 41 be 40 00 32 06  5d 0d 97 2a 4f a1 89 cc   .@A.@.2. ]..*O...
0020  39 55 eb de 00 50 e6 f5  d9 a7 00 00 00 00 b0 02   9U...P.. ........
0030  ff ff 91 ca 00 00 02 04  05 ac 01 03 03 05 01 01   ........ ........
0040  08 0a 11 ce 3c b3 00 00  00 00 04 02 00 00         ....<... ......
```