

Livello di Rete

Instradamento in Internet

Obiettivo. La funzione di instradamento (routing).
Costruzione della tabella di routing. Algoritmi di routing adattivi: distance vector routing e link-state routing. Routing gerarchico.

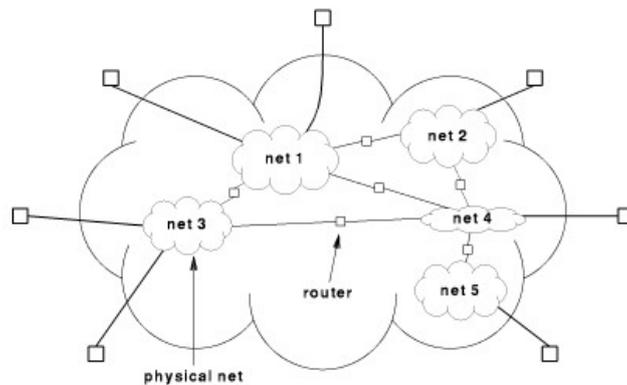
Indirizzamento in Internet

IPv4 datagram. Classi di indirizzi IP. Notazione decimale a punti. Indirizzi speciali e privati. Assegnazione degli indirizzi IP. Subnetting e supernetting. CIDR. Inoltro dei datagrammi IP. DHCP. NAT. IPv6

Prof. Filippo Lanubile

Obiettivo

- Trasporto di pacchetti da una sorgente ad una destinazione
- Può essere necessario attraversare diversi router intermedi e quindi scegliere il percorso più appropriato



Prof. Filippo Lanubile

Organizzazione del livello di rete

- Come la rete gestisce un messaggio frammentato in più pacchetti?
- Tipi di servizio
 - Servizio di rete orientato alla connessione
 - Commutazione di pacchetto a circuito virtuale
 - Usato prevalentemente all'interno di reti geografiche
 - Servizio di rete senza connessione
 - Commutazione di pacchetto datagram
 - Usato prevalentemente per l'interconnessione di reti

Prof. Filippo Lanubile

Livello di rete in Internet

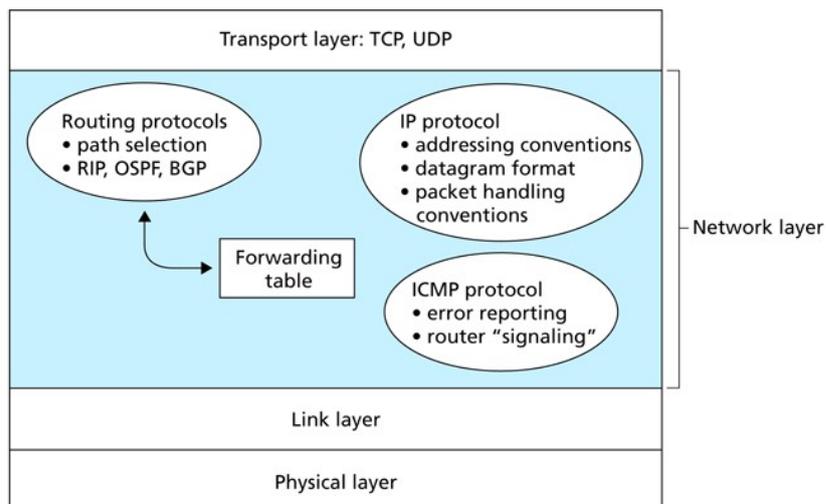
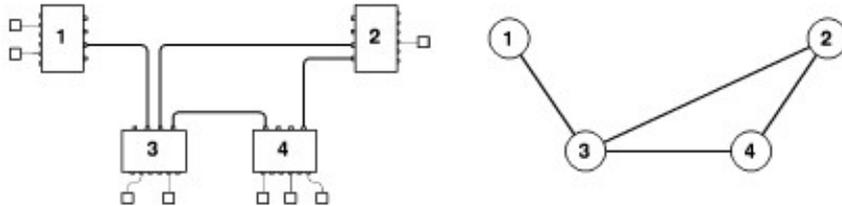


Figure 4.12 ♦ A look inside the Internet's network layer

La funzione di instradamento

- Una rete (o inter-rete) e' modellizzabile come un grafo con nodi che rappresentano gli host ed elementi intermedi (Router) e legami che rappresentano le linee di comunicazione



- La funzione di **instradamento** (*routing*) ha la responsabilità di determinare il percorso seguito dai pacchetti dall'origine alla destinazione
- La funzione di **inoltro** (*forwarding*) ha la responsabilità di trasferire i pacchetti da un'interfaccia di ingresso a una di uscita di un router

Prof. Filippo Lanubile

Routing Table

- Un router realizza la funzione di routing per mezzo di una routing table
 - una registrazione per ogni destinazione
 - per ogni registrazione, indirizzo del salto successivo (canale su cui instradare il pacchetto)

destin- ation	next hop	destin- ation	next hop	destin- ation	next hop	destin- ation	next hop
1	-	1	(2,3)	1	(3,1)	1	(4,3)
2	(1,3)	2	-	2	(3,2)	2	(4,2)
3	(1,3)	3	(2,3)	3	-	3	(4,3)
4	(1,3)	4	(2,4)	4	(3,4)	4	-
<i>node 1</i>		<i>node 2</i>		<i>node 3</i>		<i>node 4</i>	

Prof. Filippo Lanubile

Costruzione della routing table

- La routing table può essere costruita come output di un **algoritmo di routing**
- Il problema da risolvere è: trovare il cammino minimo tra due nodi
- Gli archi sono pesati
 - Metrica di prestazione/costo: distanza, lunghezza delle code, ritardo medio di un pacchetto, larghezza di banda del canale
- Fattori critici: topologia e traffico

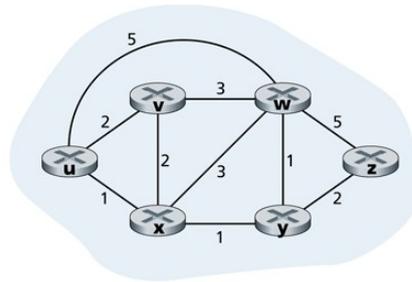


Figure 4.27 ♦ Abstract graph model of a computer network

Prof. Filippo Lanubile

Classificazione degli algoritmi di routing

statico vs dinamico

- Routing statico (algoritmi non adattivi)
 - la scelta del cammino è calcolata in anticipo e memorizzata in una memoria non volatile
- Routing dinamico (algoritmi adattivi)
 - la scelta del cammino varia secondo i cambiamenti di topologia e di traffico

globale vs decentralizzato

- Routing globale
 - L'algoritmo riceve in ingresso tutti i collegamenti tra i nodi e i loro costi.
- Routing decentralizzato
 - Nessun nodo possiede informazioni complete sulla rete
 - Il cammino a costo minimo viene calcolato in modo distribuito e iterativo

Prof. Filippo Lanubile

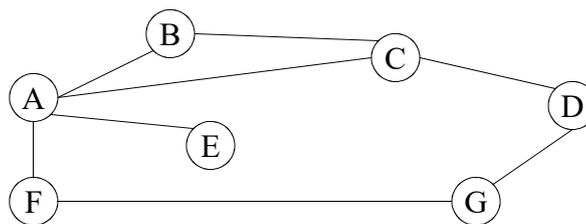
Algoritmo del vettore distanza (o di Bellman-Ford)

Distance vector routing

- Routing dinamico e decentralizzato
- Implementato dal protocollo RIP (routing information protocol)
- Ogni router mantiene una tabella contenente la migliore distanza (costo) conosciuta per ogni destinazione e quale canale utilizzare per raggiungerla
(Destination, Cost, NextHop)

Prof. Filippo Lanubile

Algoritmo del vettore distanza: rete di esempio



Routing table
del nodo B

Destination	Cost	Next Hop
A	1	A
C	1	C
D	2	C
E	2	A
F	2	A
G	3	A

Prof. Filippo Lanubile

Algoritmo del vettore distanza: stato iniziale

- ogni nodo conosce i costi dei collegamenti ai nodi adiacenti
- i collegamenti ai nodi non adiacenti o i collegamenti interrotti hanno costo infinito

	A	B	C	D	E	F	G
A	0	1	1	∞	1	1	∞
B	1	0	1	∞	∞	∞	∞
C	1	1	0	1	∞	∞	∞
D	∞	∞	1	0	∞	∞	1
E	1	∞	∞	∞	0	∞	∞
F	1	∞	∞	∞	∞	0	1
G	∞	∞	∞	1	∞	1	0

Prof. Filippo Lanubile

Algoritmo del vettore distanza: aggiornamento tabelle

- Ogni nodo spedisce aggiornamenti ai suoi nodi adiacenti e riceve aggiornamenti dai suoi nodi adiacenti
 - periodicamente
 - se la tabella cambia (triggered update)
- Ogni aggiornamento è il vettore distanza
 - lista di coppie (Destination, Cost)
- Un nodo aggiorna la tabella locale se riceve un cammino migliore:
 - somma il costo minore al costo del nodo che lo ha proposto
 - es. A propone a B un costo 1 per raggiungere E: B aggiorna il costo per raggiungere E con $2 = 1 + 1$
 - prende nota (come Next Hop) del nodo che lo ha proposto
- Dopo aver scambiato diversi aggiornamenti con i nodi adiacenti, tutti i nodi conosceranno i cammini migliori verso tutti gli altri nodi

Prof. Filippo Lanubile

Algoritmo del vettore distanza: stato finale

	A	B	C	D	E	F	G
A	0	1	1	2	1	1	2
B	1	0	1	2	2	2	3
C	1	1	0	1	2	2	2
D	2	2	1	0	3	2	1
E	1	2	2	3	0	2	3
F	1	2	2	2	2	0	1
G	2	3	2	1	3	1	0

Prof. Filippo Lanubile

Che succede se il collegamento tra F e G si interrompe?

- Il sistema aggiorna le proprie tabelle e ritorna di nuovo stabile
 - F si accorge che il collegamento a G è interrotto
 - F aggiorna a infinito la distanza da G e spedisce l'aggiornamento ad A
 - A aggiorna a infinito la distanza da G perché usa F per raggiungere G
 - A riceve un aggiornamento periodico da C con un percorso verso G di costo 2
 - A aggiorna a costo 3 via C la distanza da G e spedisce l'aggiornamento a F
 - F aggiorna a costo 4 via A la distanza da G

Prof. Filippo Lanubile

Che succede se il collegamento tra A ed E si interrompe?

- Problema del conteggio all'infinito: Il sistema non si stabilizza e nessuno riesce a sapere che E è irraggiungibile
 - A si accorge che il collegamento ad E è interrotto
 - A aggiorna a infinito la distanza da E spedisce l'aggiornamento a B e C
 - B aggiorna ad infinito la distanza da E perché usa A per raggiungere E
 - Ma B riceve un aggiornamento da C (spedito prima C ricevesse l'aggiornamento da A) che lo informa che E è raggiungibile a costo 2
 - B aggiorna a costo 3 via C la distanza da E e spedisce l'aggiornamento ad A
 - A aggiorna a costo 4 via B la distanza da E e spedisce l'aggiornamento a C
 - C (che ora ha un costo infinito per E) aggiorna a costo 5 via A la distanza da E e spedisce l'aggiornamento a B ...
- Soluzione:
 - tagliare i cicli di routing (split horizon): non si rimandano al nodo adiacente la notifica di aggiornamenti effettuati su informazioni provenienti da quel nodo

Prof. Filippo Lanubile

Algoritmo dello stato della connessione

Link-state routing

- Routing dinamico e globale
- Implementato dal protocollo OSPF (open shortest path first)
- Funzioni di base
 - Distribuzione affidabile a tutti i nodi delle informazioni sullo stato dei collegamenti
 - Ogni nodo sarà in grado di costruire una mappa completa della rete
 - Calcolo presso ciascun nodo del cammino minimo verso una data destinazione

Prof. Filippo Lanubile

Distribuzione affidabile dello stato delle connessioni

Strategia

- spedire a tutti i nodi (non solo quelli adiacenti) le informazioni sui collegamenti diretti

Tattica: reliable flooding

- il nodo emette su tutte le sue linee in uscita le informazioni sui collegamenti diretti
- i nodi riceventi propagano le informazioni ricevute su tutte le loro linee in uscita
- la distribuzione va avanti finchè le informazioni non si sono propagate a tutti i nodi della rete

Pacchetto di stato della connessione (Link State Packet, LSP)

- id del nodo che ha creato l'LSP
- costo del collegamento per ogni nodo adiacente
- numero di sequenza (SEQNO a 64 bit)
- tempo di vita (TTL)

Reliable flooding

- memorizza l'LSP più recente da ogni nodo
- Se riceve un nuovo LSP (SEQNO maggiore) propaga l'LSP a tutti i nodi eccetto il nodo da cui proviene
- genera periodicamente un nuovo LSP incrementando il SEQNO
- inizializza SEQNO a 0 al reboot
- decrementa TTL di ogni LSP memorizzato: un pacchetto con TTL a 0 è scartato

Prof. Filippo Lanubile

Calcolo del cammino minimo

- Con la ricezione di tutti i pacchetti LSP ogni nodo è in grado di costruire la mappa completa della rete
- Algoritmo di Dijkstra per il calcolo del cammino minimo
 - Dato un grafo con un costo non negativo assegnato ad ogni arco e un nodo sorgente designato
 - Calcola la distanza (costo) minima dal nodo sorgente a ogni altro nodo e una next hop routing table
- Esistono diverse varianti

Prof. Filippo Lanubile

Una variante dell'algorithmo di Dijkstra

- Grafo $G = (N, E)$, N insieme dei nodi ed E l'insieme degli archi
- $weight(i,j)$ denota il costo (weight) associato all'arco (i,j)
- $s \in N$ denota il nodo sorgente considerato
- $M \subseteq N$ denota l'insieme dei nodi già esaminati
- $D(n)$ denota la distanza (costo) del cammino minimo da s al nodo n
- $R(n)$ denota il next hop nel cammino minimo da s al nodo n

```
/* inizializzazione */
M = {s}
for each n ∈ N - {s} {
  if (s,n) ∈ E {
    D(n) = weight(s,n)
    R(n) = s
  }
  else {
    D(n) = ∞
    R(n) = 0
  }
}
```

Prof. Filippo Lanubile

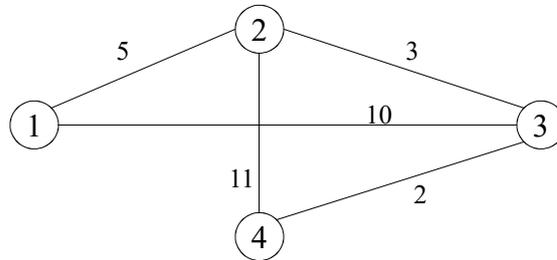
Una variante dell'algorithmo di Dijkstra

- Grafo $G = (N, E)$, N insieme dei nodi ed E l'insieme degli archi
- $weight(i,j)$ denota il costo (weight) associato all'arco (i,j)
- $s \in N$ denota il nodo sorgente considerato
- $M \subseteq N$ denota l'insieme dei nodi già esaminati
- $D(n)$ denota la distanza (costo) del cammino minimo da s al nodo n
- $R(n)$ denota il next hop nel cammino minimo da s al nodo n

```
/* visita dei nodi */
while (N ≠ M) {
  scegli u tale che D(u) è il minimo ∀u ∈ (N - M)
  M = M ∪ {u}
  for each n ∈ (N - M) tale che (u,n) ∈ E {
    c = D(u) + weight(u,n)
    if (c < D(n)) {
      R(n) = R(u)
      D(n) = c
    }
  }
}
```

Prof. Filippo Lanubile

Algoritmo dello stato delle connessioni: rete di esempio



Routing table
del nodo 4

Destination	Distance (Cost)	Next Hop
1	10	3
2	5	3
3	2	3

Prof. Filippo Lanubile

Confronto tra i due algoritmi

Distance Vector Routing

- un nodo scambia informazioni (vettore distanza) solo con i nodi adiacenti
- un nodo invia tutte le informazioni di routing in suo possesso
- Converge più lentamente:
 $O(|N| \cdot |E|)$
- non richiede molta memoria

Link State Routing

- un nodo scambia informazioni (LSP) con tutti gli altri nodi
- un nodo invia le informazioni di routing sicure cioè solo quelle relative ai nodi adiacenti
- Converge più rapidamente:
da $O(|N|^2)$ fino a
 $O(|E| + |N| \log |N|)$
- molta memoria richiesta per memorizzare gli LSP

Prof. Filippo Lanubile

Routing gerarchico

- Problema delle dimensioni della routing table
- Soluzione: suddivisione gerarchica dei router in regioni, anche dette sistemi autonomi (AS)
 - ogni routing table contiene:
 - una registrazione per ogni router del proprio AS
 - una registrazione per almeno un router di frontiera (gateway router)
- Interior Gateway Protocols:
protocolli di routing interni a un AS
 - RIP (Routing Information Protocol) basato su distance vector routing
 - OSPF (Open Shortest Path First) basato su link state routing
- Exterior Gateway Protocols:
protocolli di routing tra AS
 - BGP (Border Gateway Protocol)

Prof. Filippo Lanubile

IP - Internet Protocol

- Fornisce un metodo best-effort per trasportare datagram dalla sorgente alla destinazione, indipendentemente dall'esistenza di reti intermedie lungo il percorso
- Non orientato alla connessione:
 - ogni datagram contiene l'indirizzo di partenza e di destinazione e può seguire un percorso diverso
- Non affidabile:
 - i datagram possono non arrivare o arrivare nell'ordine sbagliato
- Frammentazione
- Versione più diffusa: IPv4 (indirizzo 32 bit)
- Versione più recente: IPv6 (indirizzo 128 bit, sicurezza, ...)

Prof. Filippo Lanubile

Frammentazione

- L'unità massima di trasmissione (MTU) è la massima quantità di dati che un frame a livello di collegamento può trasportare
 - Differenti tipi di link, differenti MTU
- I datagram IP possono essere frammentati e poi ricostruiti alla destinazione
- I datagram IP possono arrivare fino a 64KB
 - quando un host è collegato a una LAN Ethernet sono lunghi circa 1500 byte per non dover frammentare già in partenza

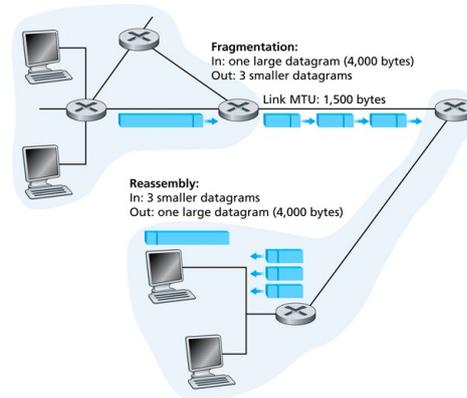


Figure 4.14 ♦ IP fragmentation and reassembly

Prof. Filippo Lanubile

Formato di un IP datagram

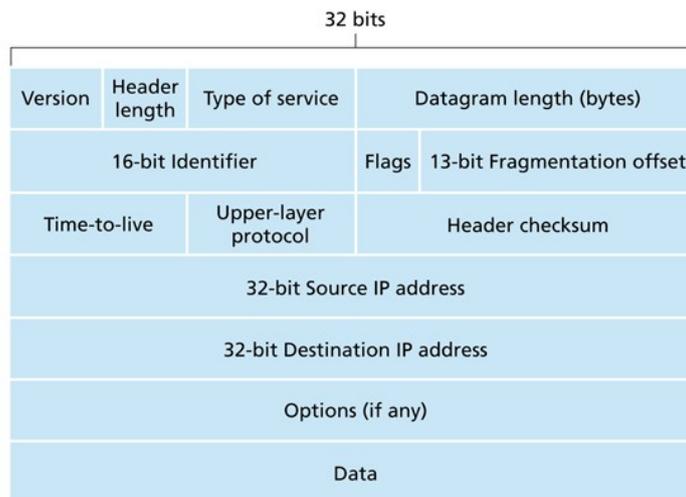


Figure 4.13 ♦ IPv4 datagram format

Nodi e indirizzi IP

- Un'interfaccia di rete è il confine tra un nodo e il collegamento fisico
- Ogni interfaccia di host e router ha un indirizzo IP
 - Un host, in genere, ha unico indirizzo IP
 - Ma un proxy server ha 2 indirizzi IP
 - I router hanno almeno due indirizzi IP

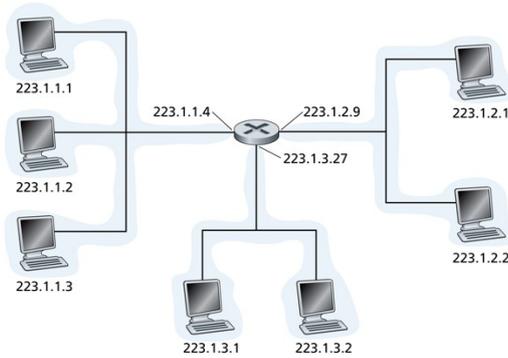


Figure 4.15 ♦ Interface addresses and subnets

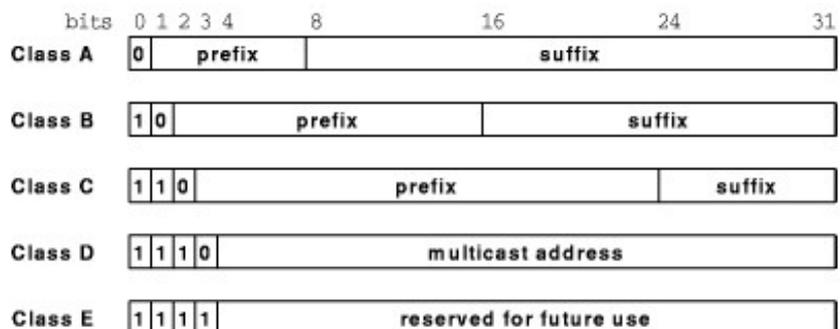
Prof. Filippo Lanubile

Formato di un indirizzo IP

- Indirizzo formato da un prefisso e un suffisso
- Il prefisso identifica la rete (netid)
 - ogni rete in Internet ha un netid unico che è assegnato dal NIC
- Il suffisso identifica l'host all'interno della rete (hostid)
 - l'hostid è unico per quel prefisso ed è gestito dall'amministratore della rete

Prof. Filippo Lanubile

Classi di indirizzi IP



Address Class	Bits In Prefix	Maximum Number of Networks	Bits In Suffix	Maximum Number Of Hosts Per Network
A	7	128	24	16777216
B	14	16384	16	65536
C	21	2097152	8	256

Prof. Filippo Lanubile

Notazione decimale a punti

32-bit Binary Number	Equivalent Dotted Decimal
10000001 00110100 00000110 00000000	129 . 52 . 6 . 0
11000000 00000101 00110000 00000011	192 . 5 . 48 . 3
00001010 00000010 00000000 00100101	10 . 2 . 0 . 37
10000000 00001010 00000010 00000011	128 . 10 . 2 . 3
10000000 10000000 11111111 00000000	128 . 128 . 255 . 0

Class	Range of Values
A	0 through 127
B	128 through 191
C	192 through 223
D	224 through 239
E	240 through 255

Prof. Filippo Lanubile

Indirizzi speciali



Prefix	Suffix	Type Of Address	Purpose
all-0s	all-0s	this computer	used during bootstrap
network	all-0s	network	identifies a network
network	all-1s	directed broadcast	broadcast on specified net
all-1s	all-1s	limited broadcast	broadcast on local net
127	any	loopback	testing

Prof. Filippo Lanubile

Subnetting

- Sottorete
 - una rete isolata i cui punti terminali sono collegati all'interfaccia di un host o di un router
- Necessità di decomporre in sottoreti blocchi di indirizzi troppo grandi
 - Specificare la sottorete usare non solo i bit del prefisso ma anche i primi bit del suffisso
 - Non è più sufficiente conoscere la classe di indirizzo per riconoscere il netid
- Subnet mask (maschera di sottorete)
 - specifica quale parte dell'indirizzo indica la sottorete e quale indica l'host
 - 255.0.0.0 subnet mask di default per classe A
 - 255.255.0.0 subnet mask di default per classe B
 - 255.255.255.0 subnet mask di default per classe C
 - 255.255.255.240 subnet mask per sottorete di classe C

Prof. Filippo Lanubile

Notazione CIDR

Classless InterDomain Routing

- Schema di indirizzamento che ha sostituito lo schema classfull per indicare un blocco di indirizzi IP

– *Blocco di indirizzi IP / x*

x è il numero di bit (a partire da sinistra) del netid

- 25.0.0.0/8 ⇔ 25.0.0.0 – 25.255.255.255
- 25.50.0.0/16 ⇔ 25.50.0.0 – 25.50.255.255
- 132.70.0.0/16 ⇔ 132.70.0.0 - 132.70.255.255
- 193.204.187.0 / 24 ⇔ 193.204.187.0 - 193.204.187.255

Prof. Filippo Lanubile

Supernetting

- Super-rete
 - blocco contiguo di reti IP accorpate insieme e indirizzate come fossero un'unica rete IP
- Le tabelle di routing possono contenere un'unica registrazione per la super-rete

193.0.0.0/8 ⇔ 193.0.0.0 - 193.255.255.255

invece di

193.0.0.0 /24

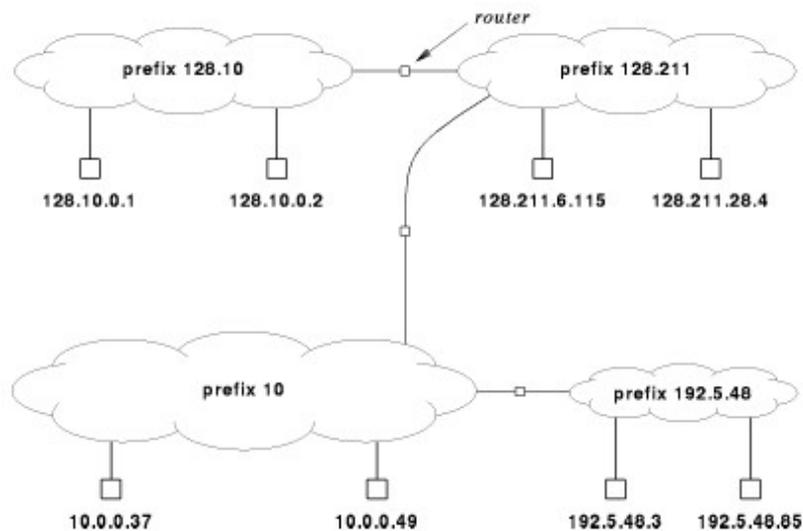
193.0.1.0/24

...

193.255.255.0/24

Prof. Filippo Lanubile

Assegnazione di indirizzi IP in una inter-rete



Prof. Filippo Lanubile

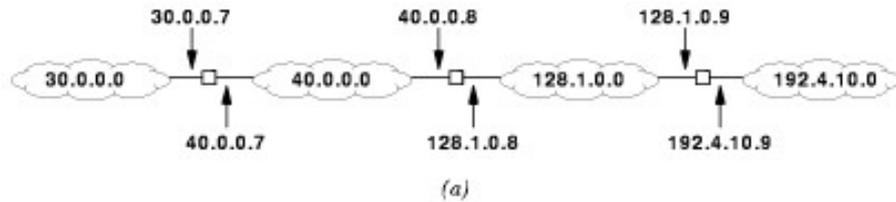
Indirizzi IP privati

- Utilizzabili per inter-reti private, ovvero reti private che usano l'Internet suite ma non sono interconnesse ad Internet

Class	Network Address Range
A	10.0.0.0 - 10.255.255.255 (10.0.0.0/8)
B	172.16.0.0 – 172.31.255.255 (172.16.0.0/12)
C	192.168.0.0-192.168.255.255 (192.168.0.0/16)

Prof. Filippo Lanubile

Inoltro dei datagrammi IP



Destination	Mask	Next Hop
30.0.0.0	255.0.0.0	40.0.0.7
40.0.0.0	255.0.0.0	deliver direct
128.1.0.0	255.255.0.0	deliver direct
192.4.10.0	255.255.255.0	128.1.0.9

- Quando arriva un datagramma con indirizzo di destinazione D, il router esegue in loop la seguente istruzione
if ((Mask[i] & D)==Destination[i] then forward to NextHop[i];
- Es. se arriva un datagramma per 192.4.10.3 il next hop è 128.1.0.9 perché $255.255.255.0 \& 192.4.10.3 == 192.4.10.0$

Prof. Filippo Lanubile

Esercizi

<http://subnettingpractice.com/subnets.html>

Prof. Filippo Lanubile

DHCP

Dynamic Host Configuration Protocol

- permette a un host di ottenere un indirizzo IP in modo automatico

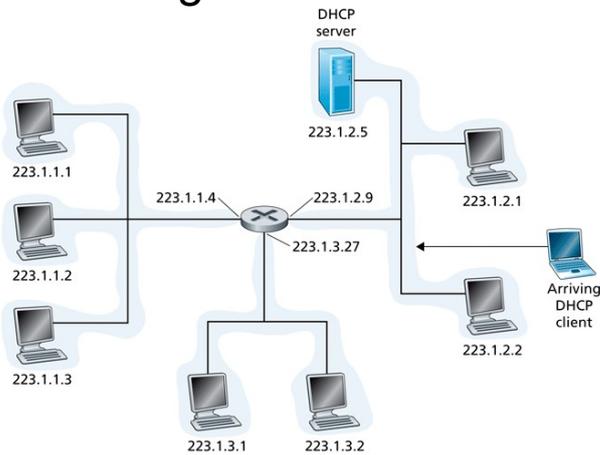
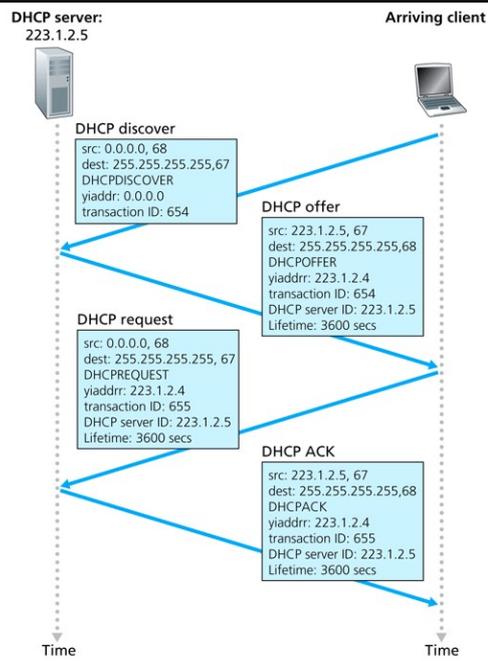


Figure 4.20 ♦ DHCP client-server scenario

Scenario DHCP



Prof. Filippo Lanubile

Figure 4.21 ♦ DHCP client-server interaction

Traduzione degli indirizzi di rete (NAT)

Una rete con router NAT appare con un unico indirizzo IP pubblico

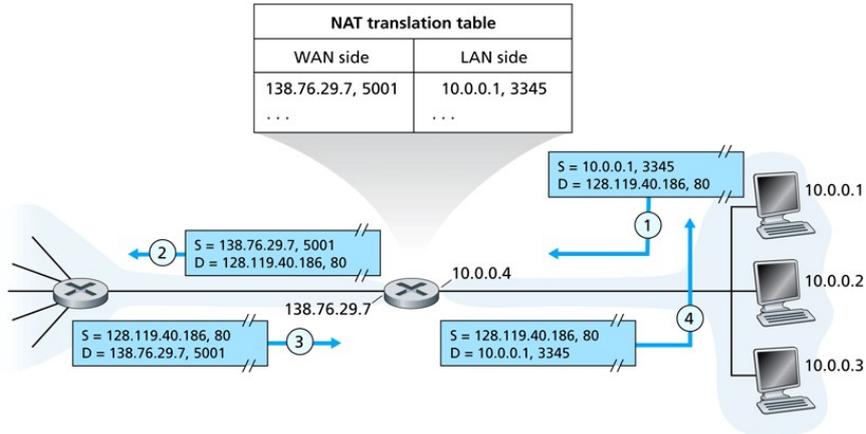


Figure 4.22 ♦ Network address translation

IPv4 address space as of October 18, 2010

■ Used
 ■ Free
 ■ Unusable

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111
112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127
128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143
144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159
160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175
176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191
192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207
208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223
224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239
240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255

IPv6

- 1992: IETF crea un gruppo per risolvere l'emergenza degli indirizzi IP in esaurimento
 - » <http://www.ipv6forum.com/>
- Altre motivazioni
 - Efficienza (header a lunghezza fissa, no checksum)
 - Supporto alla sicurezza
 - Supporto alla QoS
 - Supporto alla mobilità
 - ...
- Oggi: IPv6 è implementato in tutti i router e host attualmente prodotti

Prof. Filippo Lanubile

Indirizzi IPv6

- 128 bit (16 byte)
- Notazione esadecimale
 - 8 blocchi da 16 bit ognuno
 - 2001:0000:1234:0000:0000:00D0:ABCD:0532
- Scrittura semplificata
 - zero opzionali a sinistra di ogni campo
 - 2001:0:1234:0:0:D0:ABCD:532
 - Campi successivi di zero rappresentati da :: (solo una volta)
 - 2001:0:1234::D0:ABCD:532
 - 0:0:0:0:0:0:1 => ::1 (indirizzo di loopback)

Prof. Filippo Lanubile

Indirizzi IPv6

- Nessuna maschera di sottorete
- Subnet Prefix (64 bit) + Host Identifier (64 bit)
 - I primi 64 bit indicano il netid
 - I primi 48 bit usati per le tabelle di routing
 - I successivi 16 bit per definire sottoreti
 - Gli ultimi 64 bit indicano l'hostid

Prof. Filippo Lanubile

Passaggio da IPv4 a IPv6: doppia pila (dual stack)

- Nodi capaci di inviare e ricevere sia datagrammi IPv4 che IPv6
- Doppio indirizzamento gestito dal DNS

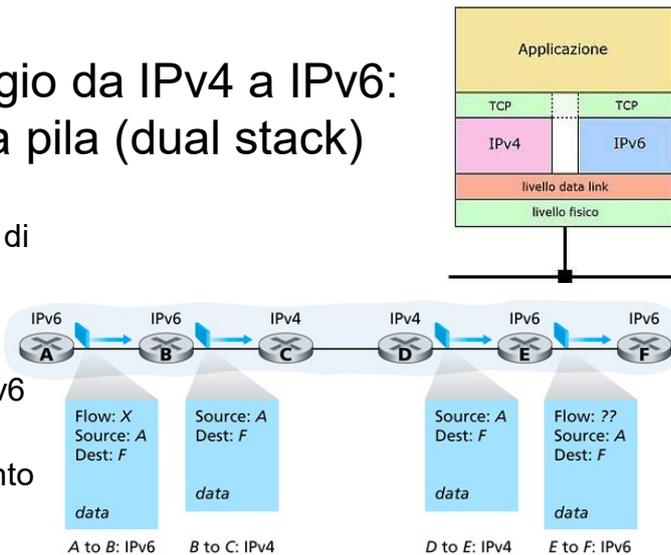


Figure 4.25 ♦ A dual-stack approach

Prof. Filippo Lanubile

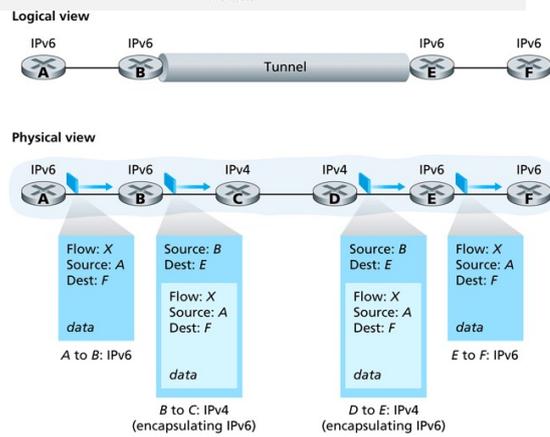
<https://tools.ietf.org/html/rfc4213>

Passaggio da IPv4 a IPv6: tunneling



Datagram IPv6
incapsulati in
datagram IPv4

- Protocol numbers
– 6 TCP
– 17 UDP
– 41 IPv6
blocked by most
home routers



<https://tools.ietf.org/html/rfc4213> **Figure 4.26** ♦ Tunneling