

James F. Kurose  
Keith W. Ross

# RETI DI CALCOLATORI E INTERNET

Un approccio top-down

Sesta edizione

© 2013 Pearson Italia, Milano-Torino

*Authorized translation from the English language edition, entitled **COMPUTER NETWORKING: A TOP-DOWN APPROACH**, 6<sup>th</sup> edition by **JAMES KUROSE**; **KEITH ROSS**, published by Pearson Education, Education, Inc, publishing as Addison-Wesley, Copyright © 2013*

*All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.*

*Italian language edition published by Pearson Italia S.p.A., Copyright © 2013.*

Le informazioni contenute in questo libro sono state verificate e documentate con la massima cura possibile. Nessuna responsabilità derivante dal loro utilizzo potrà venire imputata agli Autori, a Pearson Italia S.p.A. o a ogni persona e società coinvolta nella creazione, produzione e distribuzione di questo libro.

Per i passi antologici, per le citazioni, per le riproduzioni grafiche, cartografiche e fotografiche appartenenti alla proprietà di terzi, inseriti in quest'opera, l'editore è a disposizione degli aventi diritto non potuti reperire nonché per eventuali non volute omissioni e/o errori di attribuzione nei riferimenti.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633.

Le fotocopie effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da CLEARedi, Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali, Corso di Porta Romana 108, 20122 Milano, e-mail [autorizzazioni@clearedi.org](mailto:autorizzazioni@clearedi.org) e sito web [www.clearedi.org](http://www.clearedi.org).

Curatori per l'edizione italiana: Sabrina Gaito e Dario Maggiorini

Traduzione: Sabrina Gaito

Redazione: Donatella Pepe

Impaginazione: Andrea Astolfi

Progetto grafico di copertina: Achilli Ghizzardi Associati – Milano

Stampa: Tip.Le.Co. – San Bonico (PC)

Tutti i marchi citati nel testo sono di proprietà dei loro detentori.

978-88-7192-938-5

Printed in Italy

1<sup>a</sup> edizione: marzo 2013

Ristampa						Anno					
00	01	02	03	04		13	14	15	16	17	

# Sommario

Prefazione all'edizione italiana	XIII
Prefazione	XV

<b>Capitolo 1</b>	<b>Reti di calcolatori e Internet</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Che cos'è Internet?</b>	<b>2</b>
1.1.1	Gli "ingranaggi" di Internet	2
1.1.2	Descrizione dei servizi	5
1.1.3	Che cos'è un protocollo?	6
<b>1.2</b>	<b>Ai confini della rete</b>	<b>9</b>
1.2.1	Le reti di accesso	11
1.2.2	Mezzi trasmissivi	18
<b>1.3</b>	<b>Il nucleo della rete</b>	<b>21</b>
1.3.1	Commutazione di circuito	25
1.3.2	Una rete di reti	30
<b>1.4</b>	<b>Ritardi, perdite e throughput nelle reti a commutazione di pacchetto</b>	<b>34</b>
1.4.1	Panoramica del ritardo nelle reti a commutazione di pacchetto	34
1.4.2	Ritardo di accodamento e perdita di pacchetti	37
1.4.3	Ritardo end-to-end	40
1.4.4	Throughput nelle reti di calcolatori	42
<b>1.5</b>	<b>Livelli dei protocolli e loro modelli di servizio</b>	<b>45</b>
1.5.1	Architettura a livelli	45
1.5.2	Incapsulamento	51
<b>1.6</b>	<b>Reti sotto attacco</b>	<b>53</b>
<b>1.7</b>	<b>Storia delle reti di calcolatori e di Internet</b>	<b>58</b>
1.7.1	Sviluppo della commutazione di pacchetto: 1961-1972	58
1.7.2	Reti proprietarie e internetworking: 1972-1980	59
1.7.3	1980-1990: la proliferazione delle reti	60
1.7.4	Esplosione di Internet: gli anni '90	61
1.7.5	Il nuovo millennio	62
<b>1.8</b>	<b>Riepilogo</b>	<b>63</b>
	<b>Domande e problemi</b>	<b>65</b>
	Domande di revisione	65
	Problemi	67
	<b>Esercitazioni Wireshark</b>	<b>75</b>
	<b>Intervista a Leonard Kleinrock</b>	<b>77</b>

<b>Capitolo 2</b>	<b>Livello di applicazione</b>	<b>79</b>
<b>2.1</b>	<b>Principi delle applicazioni di rete</b>	<b>80</b>
2.1.1	Architetture delle applicazioni di rete	82
2.1.2	Processi comunicanti	84
2.1.3	Servizi di trasporto disponibili per le applicazioni	86
2.1.4	Servizi di trasporto offerti da Internet	89
2.1.5	Protocolli a livello di applicazione	92
2.1.6	Applicazioni di rete trattate in questo libro	92
<b>2.2</b>	<b>Web e HTTP</b>	<b>93</b>
2.2.1	Panoramica di HTTP	94
2.2.2	Connessioni persistenti e non persistenti	95
2.2.3	Formato dei messaggi HTTP	98
2.2.4	Interazione utente-server: i cookie	103
2.2.5	Web caching	105
2.2.6	GET condizionale	109
<b>2.3</b>	<b>Trasferimento di file: FTP</b>	<b>110</b>
2.3.1	Comandi e risposte FTP	112
<b>2.4</b>	<b>Posta elettronica in Internet</b>	<b>113</b>
2.4.1	SMTP	114
2.4.2	Confronto con HTTP	118
2.4.3	Formati dei messaggi di posta	118
2.4.4	Protocolli di accesso alla posta	119
<b>2.5</b>	<b>DNS: il servizio di directory di Internet</b>	<b>123</b>
2.5.1	Servizi forniti da DNS	124
2.5.2	Panoramica del funzionameto di DNS	126
2.5.3	Record e messaggi DNS	132
<b>2.6</b>	<b>Applicazioni peer-to-peer</b>	<b>137</b>
2.6.1	Distribuzione di file P2P	137
2.6.2	Tabelle hash distribuite (DHT)	143
<b>2.7</b>	<b>Programmazione delle socket: come creare un'applicazione di rete</b>	<b>148</b>
2.7.1	Programmazione delle socket con UDP	150
2.7.2	Programmazione delle socket con TCP	154
<b>2.8</b>	<b>Riepilogo</b>	<b>159</b>
	<b>Domande e problemi</b>	<b>160</b>
	Domande di revisione	160
	Problemi	162
	<b>Esercizi di programmazione delle socket</b>	<b>170</b>
	<b>Esercitazione Wireshark: HTTP</b>	<b>172</b>
	<b>Esercitazione Wireshark: DNS</b>	<b>172</b>
	<b>Intervista a Marc Andreessen</b>	<b>173</b>

<b>Capitolo 3</b>	<b>Livello di trasporto</b>	<b>175</b>
<b>3.1</b>	<b>Introduzione e servizi a livello di trasporto</b>	<b>176</b>
3.1.1	Relazione tra i livelli di trasporto e di rete	176
3.1.2	Panoramica del livello di trasporto di Internet	179
<b>3.2</b>	<b>Multiplexing e demultiplexing</b>	<b>180</b>
<b>3.3</b>	<b>Trasporto non orientato alla connessione: UDP</b>	<b>187</b>
3.3.1	Struttura dei segmenti UDP	190
3.3.2	Checksum UDP	191
<b>3.4</b>	<b>Principi del trasferimento dati affidabile</b>	<b>192</b>
3.4.1	Costruzione di un protocollo di trasferimento dati affidabile	194
3.4.2	Protocolli per il trasferimento dati affidabile con pipeline	203
3.4.3	Go-Back-N	207
3.4.4	Ripetizione selettiva	212
<b>3.5</b>	<b>Trasporto orientato alla connessione: TCP</b>	<b>218</b>
3.5.1	Connessione TCP	218
3.5.2	Struttura dei segmenti TCP	220
3.5.3	Timeout e stima del tempo di andata e ritorno	225
3.5.4	Trasferimento dati affidabile	228
3.5.5	Controllo di flusso	236
3.5.6	Gestione della connessione TCP	238
<b>3.6</b>	<b>Principi del controllo di congestione</b>	<b>244</b>
3.6.1	Cause e costi della congestione	245
3.6.2	Approcci al controllo di congestione	251
3.6.3	Il controllo di congestione assistito dalla rete: ATM ABR	252
<b>3.7</b>	<b>Controllo di congestione TCP</b>	<b>254</b>
3.7.1	Fairness	264
<b>3.8</b>	<b>Riepilogo</b>	<b>267</b>
	<b>Domande e problemi</b>	<b>269</b>
	Domande di revisione	269
	Problemi	272
	<b>Esercizi di programmazione</b>	<b>285</b>
	<b>Esercitazione Wireshark: esplorando TCP</b>	<b>286</b>
	<b>Esercitazione Wireshark: esplorando UDP</b>	<b>286</b>
	<b>Intervista a Van Jacobson</b>	<b>287</b>
<b>Capitolo 4</b>	<b>Livello di rete</b>	<b>289</b>
<b>4.1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>290</b>
4.1.1	Inoltro e instradamento	290
4.1.2	Modelli di servizio	294

<b>4.2</b>	<b>Reti a circuito virtuale e datagram</b>	<b>296</b>
4.2.1	Reti a circuito virtuale	297
4.2.2	Reti datagram	300
4.2.3	Origini delle reti a circuito virtuale e datagram	301
<b>4.3</b>	<b>Che cosa si trova all'interno di un router?</b>	<b>302</b>
4.3.1	Elaborazione in ingresso	305
4.3.2	Struttura di commutazione	306
4.3.3	Elaborazione in uscita	309
4.3.4	Dove si verifica l'accodamento?	309
4.3.5	Funzioni di controllo del router	313
<b>4.4</b>	<b>Protocollo Internet (IP): inoltro e indirizzamento in Internet</b>	<b>313</b>
4.4.1	Formato dei datagrammi	314
4.4.2	Indirizzamento IPv4	320
4.4.3	ICMP (Internet control message protocol)	333
4.4.4	IPv6	335
4.4.5	Breve panoramica della sicurezza IP	342
<b>4.5</b>	<b>Algoritmi di instradamento</b>	<b>343</b>
4.5.1	Algoritmo di instradamento "link state" (LS)	346
4.5.2	Algoritmo di instradamento "distance vector" (DV)	350
4.5.3	Instradamento gerarchico	358
<b>4.6</b>	<b>Instradamento in Internet</b>	<b>362</b>
4.6.1	Instradamento interno ai sistemi autonomi: RIP	362
4.6.2	Instradamento interno ai sistemi autonomi: OSPF	366
4.6.3	Instradamento tra sistemi autonomi: BGP	369
<b>4.7</b>	<b>Instradamento broadcast e multicast</b>	<b>377</b>
4.7.1	Algoritmi di instradamento broadcast	377
4.7.2	Multicast	382
<b>4.8</b>	<b>Riepilogo</b>	<b>389</b>
	<b>Domande e problemi</b>	<b>390</b>
	Domande di revisione	390
	Problemi	393
	<b>Esercizi di programmazione con le socket</b>	<b>405</b>
	<b>Esercizi di programmazione</b>	<b>405</b>
	<b>Esercitazioni Wireshark</b>	<b>406</b>
	<b>Intervista a Vinton G. Cerf</b>	<b>407</b>
<b>Capitolo 5 Livello di collegamento: collegamenti, reti di accesso e reti locali 409</b>		
<b>5.1</b>	<b>Livello di collegamento: introduzione</b>	<b>410</b>
5.1.1	Servizi offerti dal livello di collegamento	412
5.1.2	Dov'è implementato il livello di collegamento?	413

<b>5.2</b>	<b>Tecniche di rilevazione e correzione degli errori</b>	<b>415</b>
5.2.1	Controllo di parità	416
5.2.2	Checksum	418
5.2.3	Controllo a ridondanza ciclica (CRC)	419
<b>5.3</b>	<b>Protocolli e collegamenti ad accesso multiplo</b>	<b>421</b>
5.3.1	Protocolli a suddivisione del canale	423
5.3.2	Protocolli ad accesso casuale	425
5.3.3	Protocolli a rotazione	433
5.3.4	DOCSIS: il protocollo a livello di collegamento per reti di accesso a Internet HFC	434
<b>5.4</b>	<b>Reti locali commutate</b>	<b>436</b>
5.4.1	Indirizzi a livello di collegamento e ARP	436
5.4.2	Ethernet	443
5.4.3	Switch a livello di collegamento	449
5.4.4	LAN virtuali (VLAN)	454
<b>5.5</b>	<b>Canali virtuali: una rete come un livello di collegamento</b>	<b>458</b>
5.5.1	Multiprotocol label switching (MPLS)	459
<b>5.6</b>	<b>Le reti dei data center</b>	<b>461</b>
<b>5.7</b>	<b>Retrospeztiva: cronaca di una richiesta di una pagina web</b>	<b>467</b>
5.7.1	Si comincia: DHCP, UDP, IP e Ethernet	468
5.7.2	Siamo ancora all'inizio: DNS e ARP	469
5.7.3	Siamo ancora all'inizio: instradamento intra-dominio al server DNS	470
5.7.4	Interazione client-server: TCP e HTTP	471
<b>5.8</b>	<b>Riepilogo</b>	<b>472</b>
	<b>Domande e problemi</b>	<b>474</b>
	Domande di revisione	474
	Problemi	475
	<b>Esercitazioni Wireshark</b>	<b>482</b>
	<b>Intervista a Simon S. Lam</b>	<b>483</b>
<b>Capitolo 6</b>	<b>Wireless e reti mobili</b>	<b>485</b>
<b>6.1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>486</b>
<b>6.2</b>	<b>Collegamenti wireless e caratteristiche di rete</b>	<b>490</b>
6.2.1	CDMA	493
<b>6.3</b>	<b>Wi-Fi: LAN wireless 802.11</b>	<b>496</b>
6.3.1	Architettura di 802.11	497
6.3.2	Protocollo MAC di 802.11	501
6.3.3	Pacchetto IEEE 802.11	507
6.3.4	Mobilità all'interno di una sottorete IP	510

6.3.5	Funzionalità avanzate di 802.11	511
6.3.6	Personal Area Network: Bluetooth e Zigbee	512
<b>6.4</b>	<b>Accesso cellulare a Internet</b>	<b>515</b>
6.4.1	Panoramica dell'architettura di una rete cellulare	515
6.4.2	Rete dati cellulare 3G: accesso Internet agli utenti delle reti cellulari	518
6.4.3	Verso il 4G: LTE	520
<b>6.5</b>	<b>Gestione della mobilità</b>	<b>522</b>
6.5.1	Indirizzamento	525
6.5.2	Instradamento verso il nodo mobile	526
<b>6.6</b>	<b>IP mobile</b>	<b>531</b>
<b>6.7</b>	<b>Gestione della mobilità nelle reti cellulari</b>	<b>534</b>
6.7.1	Instradamento delle chiamate verso utenti mobili	536
6.7.2	Handoff in GSM	538
<b>6.8</b>	<b>Wireless e mobilità: l'impatto sui protocolli a livello superiore</b>	<b>541</b>
<b>6.9</b>	<b>Riepilogo</b>	<b>543</b>
	<b>Domande e problemi</b>	<b>544</b>
	Domande di revisione	544
	Problemi	545
	<b>Esercitazioni Wireshark</b>	<b>548</b>
	<b>Intervista a Deborah Estrin</b>	<b>549</b>
<b>Capitolo 7 Reti multimediali</b>		<b>551</b>
<b>7.1</b>	<b>Applicazioni multimediali di rete</b>	<b>552</b>
7.1.1	Proprietà del video	552
7.1.2	Proprietà dell'audio	554
7.1.3	Tipi di applicazioni multimediali	555
<b>7.2</b>	<b>Streaming di video registrato</b>	<b>557</b>
7.2.1	Streaming UDP	558
7.2.2	Streaming HTTP	559
7.2.3	Streaming adattativo e DASH	563
7.2.4	Reti per la distribuzione di contenuti	565
<b>7.3</b>	<b>Voice-over-IP</b>	<b>570</b>
7.3.1	Limiti del servizio best-effort di IP	570
7.3.2	Rimozione del jitter al ricevente	572
7.3.3	Recupero dei pacchetti persi	575
7.3.4	Un caso di studio: VoIP con Skype	578
<b>7.4</b>	<b>Protocolli per applicazioni in tempo reale</b>	<b>581</b>
7.4.1	RTP	581
7.4.2	SIP	584

<b>7.5</b>	<b>Supporto di Internet alle applicazioni multimediali</b>	<b>589</b>
7.5.1	Dimensionamento delle reti best-effort	591
7.5.2	Fornitura di più classi di servizio	592
7.5.3	Diffserv	603
7.5.4	Fornire garanzie di qualità del servizio (QoS) per ogni connessione: prenotazione delle risorse e ammissione delle chiamate	606
<b>7.6</b>	<b>Riepilogo</b>	<b>609</b>
	<b>Domande e problemi</b>	<b>610</b>
	Domande di revisione	610
	Problemi	612
	<b>Esercizi di programmazione</b>	<b>620</b>
	<b>Intervista a Henning Schulzrinne</b>	<b>621</b>

<b>Capitolo 8</b>	<b>Sicurezza nelle reti</b>	<b>623</b>
<b>8.1</b>	<b>Sicurezza di rete</b>	<b>624</b>
<b>8.2</b>	<b>Principi di crittografia</b>	<b>626</b>
8.2.1	Crittografia a chiave simmetrica	627
8.2.2	Crittografia a chiave pubblica	633
<b>8.3</b>	<b>Integrità dei messaggi e firma digitale</b>	<b>638</b>
8.3.1	Funzioni hash crittografiche	639
8.3.2	Codice di autenticazione dei messaggi	641
8.3.3	Firme digitali	643
<b>8.4</b>	<b>Autenticazione</b>	<b>648</b>
8.4.1	Protocollo di autenticazione ap1.0	649
8.4.2	Protocollo di autenticazione ap2.0	649
8.4.3	Protocollo di autenticazione ap3.0	650
8.4.4	Protocollo di autenticazione ap3.1	651
8.4.5	Protocollo di autenticazione ap4.0	652
<b>8.5</b>	<b>Rendere sicura la posta elettronica</b>	<b>653</b>
8.5.1	E-mail sicure	654
8.5.2	PGP	656
<b>8.6</b>	<b>Rendere sicure le connessioni TCP: SSL</b>	<b>658</b>
8.6.1	Quadro generale	660
8.6.2	Un quadro più completo	662
<b>8.7</b>	<b>Sicurezza a livello di rete: IPsec</b>	<b>664</b>
8.7.1	IPsec e le reti virtuali private (VPN)	665
8.7.2	I protocolli AH e ESP	666
8.7.3	Associazioni di sicurezza	666
8.7.4	Il datagramma IPsec	668
8.7.5	IKE: gestione delle chiavi in IPsec	671

<b>8.8</b>	<b>Sicurezza nelle LAN wireless</b>	<b>672</b>
8.8.1	Wired equivalent privacy (WEP)	672
8.8.2	IEEE 802.11i	674
<b>8.9</b>	<b>Sicurezza operativa: firewall e sistemi di rilevamento delle intrusioni</b>	<b>676</b>
8.9.1	Firewall	676
8.9.2	Sistemi di rilevamento delle intrusioni	684
<b>8.10</b>	<b>Riepilogo</b>	<b>687</b>
	<b>Domande e problemi</b>	<b>689</b>
	Problemi	691
	<b>Laboratorio Wireshark</b>	<b>697</b>
	<b>Laboratorio IPsec</b>	<b>698</b>
	<b>Intervista a Steven M. Bellovin</b>	<b>699</b>

<b>Capitolo 9</b>	<b>Gestione della rete</b>	<b>701</b>
-------------------	----------------------------	------------

<b>9.1</b>	<b>Che cosa vuol dire gestire una rete?</b>	<b>702</b>
<b>9.2</b>	<b>Infrastruttura di gestione</b>	<b>705</b>
<b>9.3</b>	<b>L'infrastruttura di gestione standard di Internet</b>	<b>708</b>
9.3.1	Struttura delle informazioni di gestione	710
9.3.2	Base di dati gestionali: MIB	713
9.3.3	Operazioni del protocollo SNMP	715
9.3.4	Sicurezza e amministrazione	718
<b>9.4</b>	<b>ASN.1</b>	<b>720</b>
<b>9.5</b>	<b>Riepilogo</b>	<b>724</b>
	<b>Domande e problemi</b>	<b>725</b>
	Domande di revisione	725
	Problemi	726
	<b>Intervista a Jennifer Rexford</b>	<b>727</b>

	Bibliografia	729
	Indice analitico	751

# Prefazione all'edizione italiana

Sono oramai passati cinque anni dall'ultima edizione italiana di *Reti di calcolatori e Internet. Un approccio top-down* di James F. Kurose e Keith W. Ross. In questo intervallo temporale il mondo delle reti, e Internet con esso, è cambiato profondamente, portando innovazione a tutti i livelli e diventando pervasivo nella nostra vita quotidiana. Nonostante la completezza e complessità di questo testo, oggi il più adottato nelle università italiane, gli autori sono riusciti a cogliere tutti questi cambiamenti, aggiornandolo in maniera completa e organica. Questa nuova edizione, infatti, si dimostra al passo con i tempi, eliminando argomenti oramai obsoleti, e guarda al futuro affrontandone altri promettenti, anche se non ancora completamente affermati.

Da un punto di vista didattico, mai come oggi risulta significativo e strategico l'approccio top-down introdotto dagli autori nel 1994 e che oramai è diventato il segno distintivo della loro opera. Iniziare dal livello applicativo per poi scendere verso gli strati bassi della gerarchia di protocolli ha l'indubbio pregio di stimolare fortemente gli studenti nelle fasi iniziali, oltre che permettere di motivare in maniera chiara e comprensibile lo studio successivo dei livelli sottostanti.

L'edizione italiana, in particolare, cerca di dare un contributo agli studenti affinché siano pronti a inserirsi nella dimensione ormai internazionale assunta dall'argomento. È cosa nota, infatti, che il vocabolario di tecnici e operatori del settore sia un connubio di italiano e inglese a seconda non solo dell'abitudine, ma anche della disponibilità di espressioni sintetiche nell'una o nell'altra lingua. Per questo motivo si è dedicata una cura particolare al linguaggio tecnico, fornendo per ogni termine tecnico, ovunque possibile, la doppia dicitura italiana e inglese e cercando di prediligere nelle parti discorsive la versione più comunemente adottata in ambito professionale.

*Sabrina Gaito, Dario Maggiorini  
Università degli Studi di Milano*

# Prefazione

*A Julie e ai nostri 3 preziosi Chris, Charlie, Nina  
JFK*

*Un sentito ringraziamento ai miei professori,  
ai colleghi e agli studenti di tutto il mondo  
KWR*

Benvenuti alla sesta edizione di *Computer Networking: A Top-Down Approach*. Nei dodici anni intercorsi dalla pubblicazione della prima edizione il testo è stato adottato in centinaia di istituti e università, tradotto in 14 lingue e utilizzato da oltre 100 mila studenti e professionisti in tutto il mondo. Abbiamo ricevuto commenti estremamente positivi da moltissimi di questi lettori.

## **Le novità introdotte nella sesta edizione**

Riteniamo che una ragione importante del successo di questo libro risieda nel fatto che esso continui ad offrire un approccio nuovo e aggiornato all'insegnamento delle reti di calcolatori. Anche se in questa sesta edizione abbiamo introdotto delle modifiche, sono stati tuttavia mantenuti invariati quelli che crediamo (e docenti e studenti che hanno utilizzato il nostro libro hanno confermato) essere gli aspetti peculiari di questo libro: l'approccio top-down, l'attenzione a Internet, una trattazione moderna delle reti di calcolatori, la considerazione sia degli aspetti teorici sia di quelli pratici, nonché uno stile e un approccio accessibili rivolti all'apprendimento delle reti di calcolatori. La sesta edizione è stata ampiamente rivista e aggiornata.

- Il sito web del libro è stato notevolmente ampliato e arricchito, includendo le VideoNote e gli esercizi interattivi, come descritto più avanti.
- Nel Capitolo 1 abbiamo aggiornato la nostra introduzione alle reti, la trattazione delle reti di accesso a Internet è stata modernizzata (con particolare attenzione alle cable network, alla DSL e alle reti di accesso in fibra) e la descrizione dell'ecosistema degli Internet service provider è stata modificata profondamente per tenere conto del recente emergere delle reti di distribuzione di contenuti, quali ad esempio Google. Anche la trattazione della commutazione di pacchetto e di circuito è stata riorganizzata per fornire una visione più attuale che storica.
- Nel Capitolo 2 è stato rimosso del materiale ora non più attuale riguardo la ricerca di contenuti in reti peer-to-peer per poter inserire un paragrafo sulle tabelle hash distribuite. Inoltre, Python ha sostituito Java nella presentazione della programmazione con le socket. Pur continuando a esporre le idee chiave alla base dell'interfaccia con le socket, il codice Python è più facile da comprendere per un programmatore alle prime armi. Inoltre, Python, a differenza di Java, consente

l'accesso diretto alla rete, permettendo così agli studenti di costruire una più ampia varietà di applicazioni. Le esercitazioni pratiche di programmazione in Java sono state sostituite con le corrispondenti esercitazioni in Python, e ne è stata aggiunta una nuova basata su Ping ICMP. Come sempre il materiale non più presente sul libro, ad esempio il codice Java sulla programmazione con le socket, rimane disponibile sul sito web.

- Nel Capitolo 3 la presentazione di uno dei protocolli per il trasferimento affidabile dei dati è stato semplificato ed è stato aggiunto un nuovo box di approfondimento sullo splitting di TCP, comunemente utilizzato per ottimizzare le prestazioni dei servizi di cloud computing. Inoltre, la rappresentazione del controllo di congestione di TCP si appoggia ora su una rappresentazione grafica (un automa a stati finiti) per facilitarne ulteriormente la comprensione.
- Nel Capitolo 4 il paragrafo sulle architetture dei router è stato notevolmente aggiornato per rispecchiare gli sviluppi recenti del settore. Sono stati inclusi alcuni nuovi box integrativi su DNS, BGP e OSPF.
- Il Capitolo 5 è stato notevolmente esteso con tre nuovi paragrafi: uno sulle LAN virtuali (VLAN), uno sulle reti dei data center e uno sulla “cronaca di una richiesta di una pagina Web” dove si tracciano l'intera attività di rete e i protocolli coinvolti nelle apparentemente semplici operazioni di recupero e visualizzazione di una pagina web. Il capitolo è stato inoltre riorganizzato e semplificato tenendo conto dell'attuale ubiquità di Ethernet commutata nelle reti locali e del conseguente aumento dell'uso di Ethernet negli scenari punto-a-punto.
- Nel Capitolo 6 è stata ridotta la sequenza interminabile di acronimi relativi agli standard e ai protocolli della telefonia cellulare a favore di una parte sulle architetture delle reti cellulari e su come queste interagiscano con Internet per fornire connettività a dispositivi mobili. Ciò tenendo anche conto dei recenti progressi nelle reti wireless, in particolare quelli introdotti dalle architetture 4G.
- Il Capitolo 7, che si concentra sulla creazione di reti multimediali, ha subito un'importante revisione. Il capitolo include ora una discussione approfondita dello streaming video, compreso lo streaming adattivo, e un'analisi del tutto nuova ed aggiornata sulle CDN. Il materiale rimosso per far posto a questi nuovi argomenti è ancora disponibile sul sito web.
- Il Capitolo 8 ha anch'esso subito una revisione sostanziale sugli argomenti dell'autenticazione end-point (notevolmente ampliata), dei cifrari a blocchi concatenati e della crittografia a chiave pubblica. Il paragrafo relativo a IPsec è stato invece riscritto ed esteso per includere le reti private virtuali (VPN).
- È stato aggiunto materiale nuovo e interessante che riguarda i problemi di fine capitolo. Come in ogni edizione, i problemi per lo studio individuale sono stati rivisti, aggiunti o rimossi. Le esercitazioni pratiche sono state aggiornate da Ethereal a Wireshark ed è stata aggiunta una nuova esercitazione relativa a IPsec.

## **I lettori**

Il libro si rivolge a un primo corso di reti di calcolatori e può essere utilizzato sia nei dipartimenti di informatica sia in quelli di ingegneria informatica ed elettronica. In termini di linguaggi di programmazione, si presuppone solo che gli studenti abbiano dimestichezza con C, C++, Java o Python (e solo in pochi punti del volume). Inoltre, il testo, pur essendo più preciso e analitico di molti altri sull'argomento, utilizza raramente concetti matematici che non siano insegnati nelle scuole superiori. Abbiamo volutamente cercato di evitare calcoli avanzati e concetti di probabilità o processi stocastici, sebbene abbiamo incluso alcuni problemi che richiedono questo tipo di conoscenza. Il libro è pertanto appropriato per i corsi di laurea triennali e specialistici, ma si rivela utile anche per i professionisti dell'industria delle telecomunicazioni.

## **Che cosa c'è di unico in questo libro?**

L'argomento delle reti di calcolatori è decisamente complesso, dato che comprende concetti, protocolli e tecnologie interconnessi tra loro in maniera intricata. Per affrontare tale complessità, l'organizzazione di molti testi sull'argomento segue la struttura stratificata dell'architettura di rete. In tal modo, gli studenti percepiscono da subito la complessità della materia e imparano i differenti concetti e protocolli propri di ciascun livello dell'architettura, senza perdere di vista l'intero quadro in cui tutte le parti s'incastano l'una con l'altra. Dalla nostra esperienza tale approccio è di certo consigliabile da un punto di vista metodologico, tuttavia abbiamo riscontrato che il tradizionale insegnamento *bottom-up* (ossia dal livello fisico verso quello di applicazione) non rappresenta la scelta migliore per un corso moderno sulle reti di calcolatori.

## **Un approccio dall'alto verso il basso**

Dodici anni fa questo libro si avventurò in un territorio inesplorato trattando il networking in modo top-down, ossia iniziando dal livello di applicazione per scendere verso quello fisico. Il riscontro avuto da docenti e studenti ha confermato che tale approccio presenta numerosi vantaggi e funziona bene a livello didattico. In primo luogo, enfatizza il livello di applicazione, un'area in forte crescita nelle reti, nella quale si sono verificate molte delle recenti rivoluzioni di questi ultimi anni, tra cui il Web, la condivisione di file peer-to-peer e lo streaming multimediale. Dare subito importanza agli argomenti legati a questo livello rappresenta una differenza notevole rispetto all'impostazione dei testi che forniscono solo limitate informazioni sulle applicazioni di rete, sui loro requisiti, sui paradigmi a livello applicativo (come client-server e peer-to-peer) e sulle interfacce di programmazione delle applicazioni. In secondo luogo, la nostra esperienza didattica (e quella di molti docenti che hanno usato il nostro testo) mostra che affrontare le applicazioni di rete all'inizio del corso costituisce un potente strumento motivazionale. Gli studenti sono stimolati dall'idea di imparare il funzionamento di applicazioni quali l'e-mail e il Web, che utilizzano quotidianamente. Dopo aver compreso le applicazioni è più facile capire i servizi di rete neces-

sari al loro supporto ed è poi possibile esaminare i vari modi in cui tali servizi sono implementati nei livelli inferiori.

Inoltre, l'approccio top-down consente ai docenti di introdurre lo sviluppo delle applicazioni di rete in una fase iniziale. Gli studenti non soltanto vedono le modalità operative di applicazioni e protocolli comuni, ma imparano anche quanto sia facile crearne di nuovi.

Con un approccio top-down, gli studenti affrontano presto le nozioni sulla programmazione delle socket, sui modelli di servizio e sui protocolli: concetti importanti che riemergeranno in tutti i livelli successivi. Fornendo esempi di programmazione delle socket in Python, evidenziamo le idee centrali senza confondere gli studenti con codice complesso. Gli studenti della laurea triennale non dovrebbero avere difficoltà nell'interpretare codice Python.

## **Internet in risalto**

Nonostante abbiamo tolto il riferimento a Internet nel titolo di questo libro con la quarta edizione, continuiamo a usare l'architettura e i protocolli di Internet come filo conduttore per studiare i concetti fondamentali delle reti di calcolatori.

Ovviamente, includiamo anche concetti e protocolli tratti da altre architetture di rete, ma l'attenzione è chiaramente puntata su Internet. Infatti, l'organizzazione del libro ruota intorno all'architettura a cinque livelli propria di Internet: applicazione, trasporto, rete, collegamento e fisico.

Inoltre, la maggior parte degli studenti nutre uno specifico interesse riguardo a Internet e ai suoi protocolli. Sono coscienti che rappresenti una tecnologia rivoluzionaria e dirompente, che sta radicalmente trasformando il nostro mondo. Sono quindi naturalmente curiosi di conoscerne i molteplici aspetti. Pertanto, usando Internet come guida, è facile per il docente suscitare negli studenti l'interesse per i suoi principi di base.

## **Insegnare i principi delle reti**

Alle due caratteristiche peculiari di questo libro – l'approccio top-down e l'attenzione a Internet – occorre aggiungerne una terza, riassumibile nel termine “principi”. Il campo del networking è ora sufficientemente maturo da identificare un certo numero di argomenti di fondamentale importanza. Ad esempio, nel livello di trasporto le questioni fondamentali includono l'affidabilità della comunicazione su un livello di rete non affidabile, l'inizio e la fine delle connessioni e l'handshaking, il controllo di congestione e di flusso e, infine, il multiplexing.

Due argomenti di fondamentale importanza sul livello di rete sono la determinazione di percorsi “buoni” tra due router e l'interconnessione di reti eterogenee. Nel livello di collegamento un problema fondamentale è la condivisione del canale. Per quanto riguarda la sicurezza di rete, le tecniche per fornire riservatezza, autenticazione e integrità dei messaggi sono tutte basate su principi di crittografia. Questo testo identifica gli argomenti fondamentali del networking e ne tratta i diversi approcci. Apprendendo tali principi, lo studente acquisirà conoscenze “a lungo termine” e

quando gli attuali standard e protocolli di rete saranno divenuti obsoleti, i principi conserveranno la loro rilevanza.

Noi crediamo che la combinazione dell'uso di Internet con l'enfasi riguardo ad argomenti fondamentali e approcci risolutivi consenta di comprendere rapidamente ogni tecnologia di rete.

## Il sito web

L'acquisto di una copia nuova di questo libro garantisce a ogni lettore sei mesi di accesso al sito web associato: <http://hpe.pearson.it/kurose>, che include i seguenti materiali.

- **Materiale di apprendimento interattivo.** Una componente saliente di questa edizione è l'ampio spazio dedicato ai materiali on-line e alla didattica interattiva. Il sito contiene ora le VideoNote, presentazioni video di argomenti particolarmente rilevanti e soluzioni passo a passo di esercizi simili a quelli presenti alla fine di ogni capitolo. Sono stati anche aggiunti esercizi interattivi per creare problemi (e le relative soluzioni) simili ad alcuni di fine capitolo. Poiché gli studenti possono creare un numero illimitato di problemi simili con le relative soluzioni, potranno effettivamente diventare padroni della materia. Abbiamo iniziato a pubblicare tale materiale per i primi cinque capitoli, ma il sito viene continuamente aggiornato. Il sito contiene anche parecchie applet Java interattive che illustrano i concetti principali del networking. Sono inoltre disponibili questionari interattivi che consentono di valutare la comprensione di base della materia.  
I docenti possono usare questo materiale interattivo per le loro lezioni o per piccole esercitazioni.
- **Materiale tecnico aggiuntivo.** Abbiamo aggiunto nuovo materiale in ciascuna edizione del libro e contestualmente abbiamo rimosso la trattazione di alcuni argomenti per limitare il testo a una lunghezza ragionevole. Ad esempio, sono stati rimossi le reti ATM e il protocollo RTSP. Il materiale presente nelle precedenti edizioni del testo è tuttora di interesse e si può trovare sul sito web.
- **Compiti di programmazione.** Il sito web fornisce anche molti esercizi dettagliati di programmazione, che comprendono la realizzazione di un server web multithread, di un client di posta elettronica con interfaccia grafica, di un mittente e di un ricevente per un protocollo di trasmissione dati affidabile, di un algoritmo di instradamento condiviso e molto altro ancora.
- **Esercitazioni pratiche con Wireshark.** La comprensione dei protocolli di rete dipende molto dal vederli in azione. Il sito web fornisce nuovi esercizi con Wireshark, che consentono agli studenti di osservare la sequenza di messaggi scambiati tra due entità in rete. Il sito web include esercitazioni pratiche con Wireshark su HTTP, DNS, TCP, UDP, ICMP, Ethernet, ARP, WiFi e SSL. Il sito è continuamente aggiornato con nuovo materiale.

## Caratteristiche didattiche

Abbiamo entrambi tenuto corsi di reti di calcolatori per oltre vent'anni e in questo libro abbiamo riversato più di 50 anni di esperienza condivisa con molte migliaia di studenti. In questo lasso di tempo siamo anche stati ricercatori attivi su questi argomenti (ci siamo infatti incontrati per la prima volta a un master sulle reti tenuto da Mischa Schwartz nel 1979, presso la Columbia University). Riteniamo che tutto ciò ci abbia dato una visione corretta su quelle che sono state le reti e in quale direzione stanno andando. Abbiamo tuttavia resistito alla tentazione di indirizzare il materiale del libro verso i nostri progetti personali, descritti sul nostro sito web. Il testo riguarda le reti moderne e tratta i protocolli e le tecnologie così come i sottostanti principi. Crediamo anche che l'apprendimento (e l'insegnamento) della materia possano essere divertenti. Un certo senso dell'umorismo, unito all'uso di analogie ed esempi tratti dal mondo reale presenti nel testo renderanno, si spera, questo libro più stimolante.

## Supplementi per i docenti

All'indirizzo <http://hpe.pearson.it/kurose>, nell'area dedicata ai docenti è disponibile un pacchetto di supplementi riservati ai docenti che adottano il testo, scaricabili dopo una semplice procedura di registrazione.

- **Presentazioni PowerPoint.** Sono disponibili presentazioni PowerPoint con disegni e animazioni che coprono tutti e 9 i capitoli.
- **Soluzione dei problemi.** Nel sito web inoltre vengono rese disponibili le soluzioni per i problemi presentati nel testo, gli esercizi di programmazione e le esercitazioni pratiche.

## Dipendenze tra capitoli

Il primo capitolo presenta una panoramica autonoma sulle reti di calcolatori e introduce molti concetti chiave. La nostra raccomandazione è che, dopo il primo, i docenti trattino i Capitoli dal 2 al 5 in sequenza, presentando gli argomenti secondo la filosofia top-down. Ciascun capitolo si basa infatti su argomenti trattati in quelli precedenti. Dopo i primi cinque capitoli il docente può procedere con maggiore flessibilità. Non esistono, infatti, interdipendenze tra gli ultimi capitoli, che possono perciò essere affrontati in qualsiasi ordine. In ogni caso, ciascuno di essi dipende dai contenuti presentati nei primi cinque capitoli.

## Infine, saremo lieti di avere vostre notizie

Noi incoraggiamo docenti e studenti a inviarci via e-mail i loro commenti. È stato fantastico ricevere così tanti commenti da docenti e studenti di tutto il mondo riguardo le precedenti edizioni; molti dei loro suggerimenti sono stati inclusi in questa edizione. Incoraggiamo anche i docenti a inviarci le loro esercitazioni (con relative soluzioni) che costituiscano un complemento a quelle attualmente proposte. Le pubbli-

cheremo nella parte riservata ai docenti del sito web. Incoraggiamo inoltre docenti e studenti a creare nuove applet Java che illustrino i concetti e i protocolli del libro. Se avete realizzato un'applet che ritenete appropriata per il testo, per favore inviatela agli autori. Se l'applet (inclusa la terminologia e la notazione) è adeguata, saremo lieti di includerla nel sito web del testo, con appropriato riferimento ai suoi autori.

Saremmo lieti se i lettori proseguissero questa corrispondenza, mandandoci URL di particolare interesse, segnalandoci errori tipografici, dissentendo da qualsiasi nostra affermazione e comunicandoci che cosa funziona e che cosa no, magari suggerendoci ciò che ritenete dovrebbe essere o non essere incluso nella prossima edizione. Gli indirizzi sono: kurose@cs.umass.edu e ross@poly.edu.

## **Ringraziamenti**

Fin da quando abbiamo cominciato a scrivere questo libro, nel 1996, molte persone ci hanno fornito un prezioso aiuto e ci hanno suggerito come organizzare al meglio e come tenere un corso di reti: vogliamo inviare un particolare ringraziamento a tutti quelli che ci hanno aiutato dalla prima stesura fino alla sesta edizione. Siamo anche molto grati alle centinaia di lettori – studenti, docenti, professionisti – che, da tutto il mondo, ci hanno fatto pervenire considerazioni e commenti. Un ringraziamento particolare va a:

Al Aho (Columbia University)  
Hisham Al-Mubaid (University of Houston-Clear Lake)  
Pratima Akkunoor (Arizona State University)  
Paul Amer (University of Delaware)  
Shamiul Azom (Arizona State University)  
Lichun Bao (University of California at Irvine)  
Paul Barford (University of Wisconsin)  
Bobby Bhattacharjee (University of Maryland)  
Steven Bellovin (Columbia University)  
Pravin Bhagwat (Wibhu)  
Supratik Bhattacharyya (previously at Sprint)  
Ernst Biersack (Eurécom Institute)  
Shahid Bokhari (University of Engineering & Technology, Lahore)  
Jean Bolot (Technicolor Research)  
Daniel Brushteyn (former University of Pennsylvania student)  
Ken Calvert (University of Kentucky)  
Evandro Cantu (Federal University of Santa Catarina)  
Jeff Case (SNMP Research International)  
Jeff Chaltas (Sprint)  
Vinton Cerf (Google)  
Byung Kyu Choi (Michigan Technological University)  
Bram Cohen (BitTorrent, Inc.)

Constantine Coutras (Pace University)  
John Daigle (University of Mississippi)  
Edmundo A. de Souza e Silva (Federal University of Rio de Janeiro)  
Philippe Decuetos (Eurécom Institute)  
Christophe Diot (Technicolor Research)  
Prithula Dhunghel (Akamai)  
Deborah Estrin (University of California, Los Angeles)  
Michalis Faloutsos (University of California at Riverside)  
Wu-chi Feng (Oregon Graduate Institute)  
Sally Floyd (ICIR, University of California at Berkeley)  
Paul Francis (Max Planck Institute)  
Lixin Gao (University of Massachusetts)  
JJ Garcia-Luna-Aceves (University of California at Santa Cruz)  
Mario Gerla (University of California at Los Angeles)  
David Goodman (NYU-Poly)  
Yang Guo (Alcatel/Lucent Bell Labs)  
Tim Griffin (Cambridge University)  
Max Hailperin (Gustavus Adolphus College)  
Bruce Harvey (Florida A&M University, Florida State University)  
Carl Hauser (Washington State University)  
Rachelle Heller (George Washington University)  
Phillipp Hoschka (INRIA/W3C)  
Wen Hsin (Park University)  
Albert Huang (former University of Pennsylvania student)  
Cheng Huang (Microsoft Research)  
Esther A. Hughes (Virginia Commonwealth University)  
Van Jacobson (Xerox PARC)  
Pinak Jain (former NYU-Poly student)  
Jobin James (University of California at Riverside)  
Sugih Jamin (University of Michigan)  
Shivkumar Kalyanaraman (IBM Research, India)  
Jussi Kangasharju (University of Helsinki)  
Sneha Kaseria (University of Utah)  
Parviz Kermani (formerly of IBM Research)  
Hyojin Kim (former University of Pennsylvania student)  
Leonard Kleinrock (University of California at Los Angeles)  
David Kotz (Dartmouth College)  
Beshan Kulapala (Arizona State University)  
Rakesh Kumar (Bloomberg)  
Miguel A. Labrador (University of South Florida)  
Simon Lam (University of Texas)  
Steve Lai (Ohio State University)  
Tom LaPorta (Penn State University)

Tim-Berners Lee (World Wide Web Consortium)  
Arnaud Legout (INRIA)  
Lee Leitner (Drexel University)  
Brian Levine (University of Massachusetts)  
Chunchun Li (former NYU-Poly student)  
Yong Liu (NYU-Poly)  
William Liang (former University of Pennsylvania student)  
Willis Marti (Texas A&M University)  
Nick McKeown (Stanford University)  
Josh McKinzie (Park University)  
Deep Medhi (University of Missouri, Kansas City)  
Bob Metcalfe (International Data Group)  
Sue Moon (KAIST)  
Jenni Moyer (Comcast)  
Erich Nahum (IBM Research)  
Christos Papadopoulos (Colorado State University)  
Craig Partridge (BBN Technologies)  
Radia Perlman (Intel)  
Jitendra Padhye (Microsoft Research)  
Vern Paxson (University of California at Berkeley)  
Kevin Phillips (Sprint)  
George Polyzos (Athens University of Economics and Business)  
Sriram Rajagopalan (Arizona State University)  
Ramachandran Ramjee (Microsoft Research)  
Ken Reek (Rochester Institute of Technology)  
Martin Reisslein (Arizona State University)  
Jennifer Rexford (Princeton University)  
Leon Reznik (Rochester Institute of Technology)  
Pablo Rodrigez (Telefonica)  
Sumit Roy (University of Washington)  
Avi Rubin (Johns Hopkins University)  
Dan Rubenstein (Columbia University)  
Douglas Salane (John Jay College)  
Despina Saporilla (Cisco Systems)  
John Schanz (Comcast)  
Henning Schulzrinne (Columbia University)  
Mischa Schwartz (Columbia University)  
Ardash Sethi (University of Delaware)  
Harish Sethu (Drexel University)  
K. Sam Shanmugan (University of Kansas)  
Prashant Shenoy (University of Massachusetts)  
Clay Shields (Georgetown University)  
Subin Shrestha (University of Pennsylvania)

Bojie Shu (former NYU-Poly student)  
Mihail L. Sichitiu (NC State University)  
Peter Steenkiste (Carnegie Mellon University)  
Tatsuya Suda (University of California at Irvine)  
Kin Sun Tam (State University of New York at Albany)  
Don Towsley (University of Massachusetts)  
David Turner (California State University, San Bernardino)  
Nitin Vaidya (University of Illinois)  
Michele Weigle (Clemson University)  
David Wetherall (University of Washington)  
Ira Winston (University of Pennsylvania)  
Di Wu (Sun Yat-sen University)  
Shirley Wynn (NYU-Poly)  
Raj Yavatkar (Intel)  
Yechiam Yemini (Columbia University)  
Ming Yu (State University of New York at Binghamton)  
Ellen Zegura (Georgia Institute of Technology)  
Honggang Zhang (Suffolk University)  
Hui Zhang (Carnegie Mellon University)  
Lixia Zhang (University of California at Los Angeles)  
Meng Zhang (former NYU-Poly student)  
Shuchun Zhang (former University of Pennsylvania student)  
Xiaodong Zhang (Ohio State University)  
ZhiLi Zhang (University of Minnesota)  
Phil Zimmermann (independent consultant)  
Cliff C. Zou (University of Central Florida)

Vogliamo inoltre ringraziare l'intero team di Addison-Wesley, che ha svolto un lavoro assolutamente eccezionale (e coloro che hanno sopportato due autori davvero puntigliosi): Michael Hirsch, Marilyn Lloyd e Lidsay Triebel. Grazie anche a Janet Theurer e Patrice Rossi Calkin per le illustrazioni e Andrea Stefanowicz con il team di Pre-MediaGlobal per l'eccellente lavoro di produzione di questa edizione. Infine, il più speciale dei ringraziamenti va a Michael Hirsch, il nostro editor presso Addison-Wesley, e Susan Hartman, la nostra editor precedente. Il testo non sarebbe stato così com'è (e, forse, non avrebbe potuto neanche esistere) senza la loro guida, il loro costante incoraggiamento, la loro pazienza, praticamente infinita, il loro buonumore e la loro perseveranza.