Počítačové sítě

Jan Outrata

KATEDRA INFORMATIKY
UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

přednášky

Tyto slajdy byly jako výukové a studijní materiály vytvořeny za podpory grantu FRVŠ 1358/2010/F1a.

Síťová vrstva

Síťové protokoly

- **linkové protokoly**
  - vyměňují data mezi **sousedními uzly** v rámci lokální nebo rozlehlé sítě, pomocí sdíleného komunikačního média (např. Ethernet) nebo dvoubodovými linkami (např. PPP)
  - standardizované normami IEEE 802.x
- **síťové protokoly**
  - vyměňují data mezi **libovolnými (nesousedními) uzly** v rozlehlé síti tvořené mnoha lokálními sítěmi

  → data jsou **směrována (routing)** rozhlehlou sítí pomocí směrovačů – nejdůležitější funkce síťové vrstvy (protokolu)
  - dříve různá řešení (TCP/IP, ISO OSI, firemní), dnes de facto standard TCP/IP

Síťové protokoly

- **směrovač (router)**:
  - propojuje lokální sítě (LAN) na úrovni síťové vrstvy, umožňuje libovolné topologie sítě (v praxi propojené hvězdicové)
  - řeší směrování z lokální sítě k následujícímu směrovači nebo koncovému uzlu (**next hop**), rozhoduje na základě svých **směrovacích tabulek**
  - = běžný počítač nebo specializované zařízení (směrovač, router) s **více síťovými rozhraními**, předávající si data mezi rozhraními – **forwarding**
  - „vybaluje“ data (síťový paket) z linkového rámce a „zabaluje“ do jiného linkového rámce – i když jsou linkové protokoly sítí stejné!
  - nemění síťový paket (např. adresy)!, až na výjimky, např. položka TTL, fragmentace, volitelné položky aj.
- **koncové uzly** – vysílají a přijímají síťové pakety „zabalené“ do linkových rámců

Návaznost na linkovou vrstvu

– fyzická a linková vrstva implementována na síťové kartě (HW) a jejím ovladačem (driver, SW)

→ **rozhraní ovladače** – standardizovaný způsob přístupu ze síťové vrstvy k linkové, funkce:

- výběr linkového protokolu (rámce)
- identifikace a přepínání síťového protokolu (buffer, např. SSAP, DSAP)
- „zabalování“ síťových paketů a „rozbalování“ linkových rámců
- služby podvrstvy LLC (správa linkových spojů)

– standardizovaná rozhraní: PKDRV (Packet Driver, pro TCP/IP), **NDIS** (Network Driver Interface Specification, Microsoft/IBM, vyžaduje linkový protokolový ovladač, kterému NDIS ovladač předává rámce)

Internet Protocol (IP)

- 1980 RFC-760, 1981 RFC-791
- poskytuje **„nespolehlivou“ nespojovanou službu** – nevytváří spojení, nepotvrzuje příjem paketů
- spojuje lokální sítě do celosvětové sítě **Internet**
- tvořen několika dílčími protokoly: vlastní IP a služební **ICMP** (diagnostika a signalizace mimořádných stavů), **IGMP** (skupinové adresování), **ARP** a **RARP** (zjištění linkové adresy k IP adrese a opačně)
- síťové rozhraní uzlu má alespoň jednu **síťovou IP adresu**

IP paket (datagram)

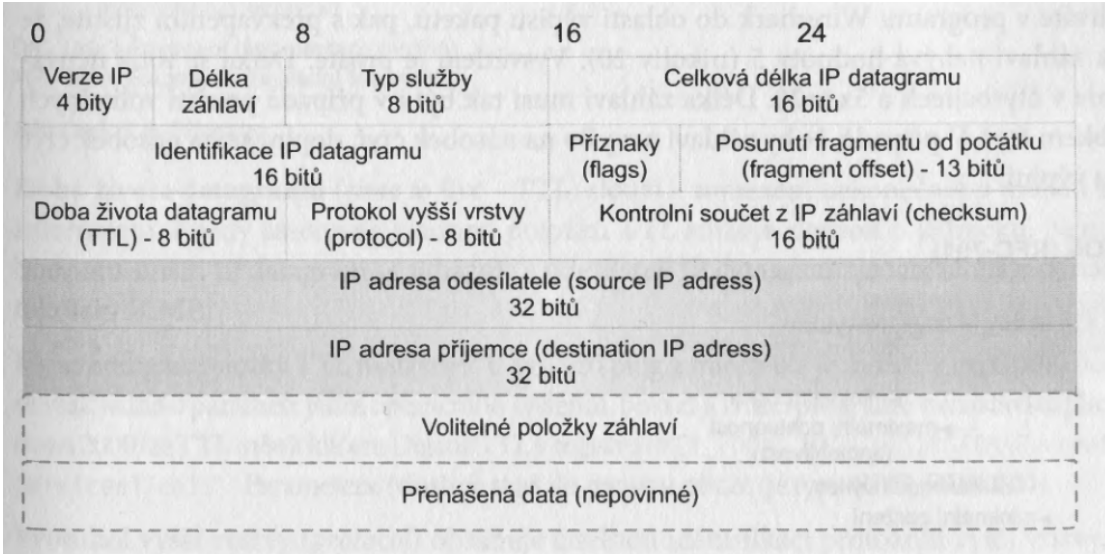
– základní jednotka dat přenášených IP

= záhlaví 20 B povinných položek + volitelné položky, data, max. délka 64kB

Obrázek: Obrázek průvodce 131

- délka záhlaví: v jednotkách 4 B, tzn. max. 60 B
- **typ služby (TOS)**: původně specifikace kvality přenosu (bity pro prioritu, min. zdržení a cena, max. výkon a dostupnost), dnes **DS (Differentiated Services)** – požadavky garance šířky pásma, protokol RSVP
- identifikace, příznaky a posunutí **fragmentu**: pro účely **fragmentace paketu**, bity příznaků pro zakázání fragmentace (DF) a indikaci dalších fragmentů (MF, tento není poslední)

IP paket (datagram)



IP paket (datagram)

- **doba života (TTL)**: zamezení nekonečného „toulání“ paketu, každý směrovač snižuje alespoň o 1 (a musí tedy změnit kontrolní součet záhlaví), při 0 se paket zahazuje a odesilateli je to signalizováno protokolem ICMP, nastavena v OS
- **protokol vyšší vrstvy**: čísla přiděluje IANA, např. ICMP 1, IGMP 2, IP 4, TCP 6, UDP 17, tunelování protokolů, např. IP over IP (privátní sítě, IPv6 over IPv4), IPX over IP

CVIČENÍ: zachytávání a inspekce IP paketů

IP adresa

– každé síťové rozhraní počítače (síťová karta) může mít jednu nebo více **jednoznačných** IP adres
– přidělení adresy síťovému rozhraní staticky pomocí programu `ipconfig` (MS Windows) nebo `ifconfig`/`ip` (UNIX, GNU/Linux)

CVIČENÍ: zjištění IP adresy síťového rozhraní a jeho změna

= číslo délky **4 B** (pro protokol IPv4), notace zápisu s hodnotami bytů v desítkové soustavě oddělenými tečkou, např. **158.194.80.13** = 10011110.11000010.01010000.00001101

IP adresa

Historie

– od počátku Internetu až do roku 1993: RFC 796

= dvě části adresy: **adresa sítě** a **adresa uzlu (rozhraní)** v síti

– jaká část pro síť určují počáteční bity prvního bytu, dělení sítí do 5 (základních) **tříd**:

- třída **A**: adresa začíná (bitem) 0, 1 byte pro síť, 126 sítí (s hodnotami prvního bytu) 1 až 126 (0 a 127 mají zvláštní význam), $2^{24} - 2$ uzlů (0 a 255 mají zvláštní význam)
- třída **B**: začíná 10, 2 byty pro síť, 2^{14} sítí 128 až 191, $2^{16} - 2$ uzlů
- třída **C**: začíná 110, 3 byty pro síť, 2^{21} sítí 192 až 223, 254 uzlů
- třída **D**: začíná 1110, nedělí se, 2^{28} skupinových adres 224.0.0.0 až 239.255.255.255 (**IP multicast**, RFC 1112)
- třída **E** (a další): začíná 1111, 2^{28} adres 240.0.0.0 až 255.255.255.254 původně rezervovaných pro speciální a experimentální účely, dnes již také přidělené

IP adresa

Historie

– speciální adresy:

- celá = 0: tento uzel (= loopback, bez přidělené adresy)
- uzel = 0: **adresa sítě**
- síť = 0: uzel na této síti (nepoužívá se)
- uzel samé 1: **všesměrová adresa sítě (network broadcast)**
- samé 1 (255.255.255.255): **všesměrová adresa lokální sítě (local broadcast)**, nesměruje se
- 127.cokoliv: programová (lokální, SW) **smyčka (loopback)**, typicky **127.0.0.1**, odeslaný paket „ihned přijde“

CVIČENÍ: zjištění všech uzlů na lokální síti pomocí programu `ping`

IP adresa

Dnes – Subsítě

- od roku 1993: RFC 1517–1520, sítě se nerozlišují podle tříd, ale podle **síťové masky**:
  - $=$ 4B číslo (notace IP adres), bity $= 1$ určují v IP adrese adresu sítě
  - $\rightarrow$ určení adresy sítě: bitový součin IP adresy a síťové masky
  - počet uzlů v síti $= 2^{(\text{počet 0 v masce})} - 2$
  - masky odpovídající třídám adres $=$ **standardní** síťové masky, pro třídu A **255.0.0.0**, pro třídu B **255.255.0.0**, pro třídu C **255.255.255.0**
  - **notace sítě spolu s maskou**: adresa sítě/maska, např. 158.194.0.0/255.255.0.0
  - v binárním vyjádření ji tvoří (de facto) zleva souvislá řada 1 $\rightarrow$ notace adresa sítě/počet 1 v masce, tzv. **CIDR formát** (Classless Inter-Domain Routing), např. 158.194.0.0/16

IP adresa

Dnes – Subsítě

= **část sítě určená maskou**: část adresy pro uzel rozdělena na část pro subsíť a pro uzel, síťová maska pokrývá část adresy pro síť i subsíť

– výjimka: síť s maskou /32 je adresou samostatného uzlu

– např. síť 158.194.0.0/16 může být rozdělena např. do 256 subsítí s adresami 158.194.0.0/24 až 158.194.255.0/24

! **nejednoznačnosti**: subsíť samé 0 (adresa uzlu samé 0) – adresa subsítě nebo celé sítě?, subsíť samé 1 (adresa uzlu samé 1) – všesměrová adresa subsítě nebo celé sítě (tj. všech subsítí)? → nepoužívají se

– síť může být na subsítě rozdělena pomocí **konstantní síťové masky** (všechny subsítě mají stejnou, viz příklad výše) nebo **variabilní síťové masky** (subsítě mají různou masku, např. 158.194.1.0/30, 158.194.80.0/20, 158.194.92.0/22) – POZOR na omezení adres subsítí!

– subsíť je možné opět pomocí „prodloužení“ masky opakovaně rozdělit do (sub)subsítí

IP adresa

Supersítě a autonomní systémy

- **supersíť** – síťová maska nepokrývá celou adresu sítě, duální k subsíti
  - použití pro **agregaci adres sítí**, výhodné pro směrování, administrativu přidělování adres apod.
  - např. síť 158.194.92.0/24 je součástí supersítě 158.194.0.0/16
- z hlediska dopravy IP paketů (směrování) se Internet dělí na tzv. **autonomní systémy (AS)** = supersítě spravované největšími poskytovateli internetového připojení, bloky IP adres v rámci AS přidělují regionální a lokální **Internet Registry**
  - např. síť 158.194.0.0/16 (UPOL-TCZ) je součástí autonomního systému AS2852 (CESNET2), který je součástí bloku AS2830 – AS2879 patřícího **RIPE NCC** (regionální Internet Registry pro Evropu a přidružené země)
  - přidělené bloky adres pro (super)sítě a autonomní systémy a informace o nich lze zjišťovat programem `whois`, např. `whois 158.194.80.13`, `whois AS2852`

Lokální síť (Intranet)

- **Intranet** = lokální síť (pro informační systém), obvykle uzavřená nebo s omezením provozu z vnější sítě dovnitř, příp. i ven

– v síti (Internetu) musí být IP adresy jednoznačné, v lokální síti:
  - libovolné adresy (jednoznačné v rámci lokální sítě) a **NAT (Network Address Translation)** = **překlad adres** lokální sítě na adresy ve vnější síti a naopak – typicky na rozhraní směrovače do vnější sítě, zvláštní případ tzv. **maškaráda** = překlad na 1 adresu (směrovače)
  - **vyhrazené rozsahy IP adres** pro uzavřené podnikové sítě (RFC1918): **10.0.0.0/8** (třída A), **172.16.0.0/12** (třída B), **192.168.0.0/16** (třída C) – použití dle libosti, **nesměrují se**
  - v praxi vyhrazený rozsah + NAT

– propojení dvou a více lokálních sítí:
  - směrovačem – jednoduché, nevýhoda komunikace přes směrovač
  - adresami sousední tvořící supersíť s kratší maskou, např. /23 pro /24

- **nečíslovaná síť**: „síť“ propojující dva směrovače (např. pomocí sériových linek), tvořící jeden „virtuální“ směrovač

Lokální síť (Intranet)

Dynamické přidělování IP adres

= oproti pevnému (statickému) podle potřeby při připojení uzlu do sítě

- v lokální síti dnes aplikační protokol **DHCP** nahrazující dřívější protokoly RARP a BOOTP
- v rozlehlé síti (typicky komutované telefonní) linkový protokol **PPP**

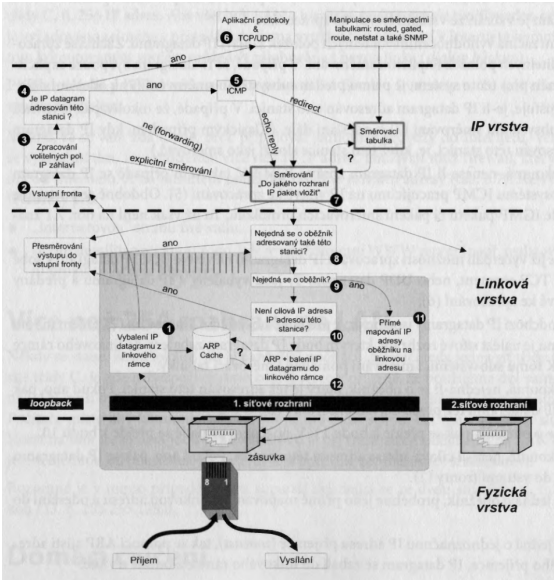
Směrování (routing)

- **směrování (routing)** = odeslání paketů na další směrovač nebo cílový uzel (next hop), popř. do lokální sítě s cílovým uzlem
- **předávání (forwarding)** = předávání paketů v rámci směrovače mezi jeho síťovými rozhraními, základ procesu směrování

– děje se (zpravidla) bez vědomí vyšších vrstev, např. aplikační, konfiguruje se parametry (jádra) OS, výjimkou je filtrace paketů při předávání

Obrázek: Obrázek průvodce 186

Směrování (routing)



Směrování (routing)

Předávání paketů a filtrace

- předávání paketů umožňuje uzlu pracovat jako **směrovač** = pokud paket není adresován jemu, odešle (předá) ho dále (jiným rozhraním), stejně jako vlastní odchozí pakety
- lze v OS povolit/zakázat za běhu, u MS Windows hodnota 1/0 v klíči `IpEnableRouter` v registru, u GNU/Linuxu v souboru `/proc/sys/net/ipv4/ip_forward`
- pakety mohou být **filtrovány** – nastavením filtračních pravidel OS nebo pomocí aplikačního programu, na základě IP záhlaví (adres), TCP/UDP záhlaví (portů, příznaků) nebo aplikačního protokolu
- filtrace se často provádí (a doporučuje se) i u koncových uzlů na vstupech jejich síťových rozhraní – posílení ochrany a bezpečnosti systému
- filtrace bývá významnou funkcí tzv. **firewallů** – programů či stanic (směrovačů) chránících systém uzlu nebo (lokální) síť před útoky

Směrování (routing)

Směrovací tabulky

– pro paket, který není určený přímo směrovači, se musí **rozhodnout**, kterým síťovým rozhraním jej odeslat dále (next hop)

→ rozhoduje se pomocí **směrovací tabulky** se směry (cestami, **route**):

síť/uzel	maska	next hop (gateway)	rozhraní	metrika, vlajky aj.
158.194.92.0	255.255.255.0	0.0.0.0	Ethernet 1	...
158.194.80.0	255.255.255.0	158.194.80.1	Ethernet 2	...
(127.0.0.0	255.0.0.0	127.0.0.1	loopback	...)
10.0.0.0	255.255.0.0	0.0.0.0	Virtual Eth.	...
...	...	...	...	...
0.0.0.0	**0.0.0.0**	158.194.254.66	Ethernet 3	...

– **setříděna sestupně podle adresy sítě** (1. sloupec) – více specifická (s delší maskou) má přednost před obecnější v případě stejných směrů pro paket

Směrování (routing)

Směrovací tabulky

- **rozhodování**:
  1. průchod tabulkou odshora dolů, log. **vynásobení cílové adresy paketu s maskou** v tabulce (2. sloupec)
  2. pokud se výsledek **rovná adrese sítě**, popř. uzlu (maska samé 1) v tabulce (1. sloupec), paket se odešle skrze rozhraní (4. sloupec) na další směrovač nebo cílový uzel (**next hop**, 3. sloupec), popř. do lokální sítě s cílovým uzlem (next hop = 0.0.0.0, tzv. **přímé směrování**), jinak další řádek
  3. poslední řádek (adresa sítě i maska = 0.0.0.0) = **výchozí (implicitní) směr** pro paket nevyhovující žádnému předchozímu záznamu (žádné síti), typicky směr do Internetu
  - agregace záznamů tabulky u supersítí a autonomních systémů

Směrování (routing)

Směrovací tabulky

- **naplnění tabulky**:
  - staticky (**statické směrování**) ručně, automaticky při konfiguraci síťového rozhraní OS (nejčastější) nebo pomocí managementu sítě (např. aplikační protokol SNMP)
  - dynamicky (**dynamické směrování**) z ICMP zpráv (změny směrování) nebo **směrovacími aplikačními protokoly**

– výpis tabulky pomocí programu `netstat`, výpis a (statická) editace správcem OS pomocí programů `route`/`ip` (UNIX, GNU/Linux), `"Směrování a vzdálený přístup"` (MS Windows Server), `ip route` (CISCO) apod.

CVIČENÍ: výpis a editace směrovací tabulky (např. výmaz a vrácení směru default) programy `netstat`, `route`, `ip` apod.

Směrovací protokoly

- aplikační protokoly k vytvoření směrů, tj. k **dynamické aktualizaci směrovacích tabulek** směrovačů, NE k vlastnímu procesu směrování
- dělení: IGP (v rámci AS) a EGP (výměna směrovacích informací mezi AS, směrovací politiky), RVP a LSP (podle použitého směrovacího algoritmu)

RVP (Routing Vector Protocols)

= algoritmus **DVA (Distance Vector Algorithm), Bellman-Fordův**: směrovač opakovaně **odešle** svou **směrovací tabulku** sousedním a z přijatých tabulek si do své dočasně (2-5 minut) doplní záznamy (vektory) pro neznámé sítě nebo s **menší vzdáleností** (metrikou, počet směrovačů na cestě) s navýšenou metrikou (typicky o 1), konec při max. metrice (např. 16) = nedostupná síť

- jednoduché, ale při výpadku připojení směrovače do sítě nebo v rozlehlejších sítích (při vyšší max. metrice) mohou tabulky **oscilovat** → nedoplňovat záznamy, které směrovač sám dříve odeslal
- např. RIP (pouze pro standardní masky), **RIP 2** (multicast 224.0.0.9), **RIPng** (pro IPv6), **IGRP**, **BGP**, program `routed`

Směrovací protokoly

LSP (Link State Protocols)

= algoritmus **LSA (Link State Algorithm)**: směrovač opakovaně ohodnotí (metrika) cesty k sousedním (např. podle odezvy) a jejich seznam spolu se sítěmi rozešle do celé rozlehlé sítě, ze získané **topologie celé sítě** si pak (dočasně) doplní/upraví záznamy v tabulce pro sítě na základě nejkratších cest vypočtených **algoritmem nalezení nejkratších cest v grafu** (**SPF, Shortest Path First, Dijkstrův**)

– rozdělení rozlehlejších sítí na **oblasti (směrovací domény)**, z více směrovačů na jedné síti se vybere jeden

– oproti RVP méně dat, **stabilnější**, pružnější, ale složitější konfigurace

– např. **OSPF** (páteřní oblast, autentizace, IPv6 aj.), IS-IS, **EGP**, program `gated`

Protokol ICMP

- Internet Control Message Protocol, RFC 777

= služební protokol IP pro **diagnostiku a signalizaci mimořádných** (chybových) **stavů**

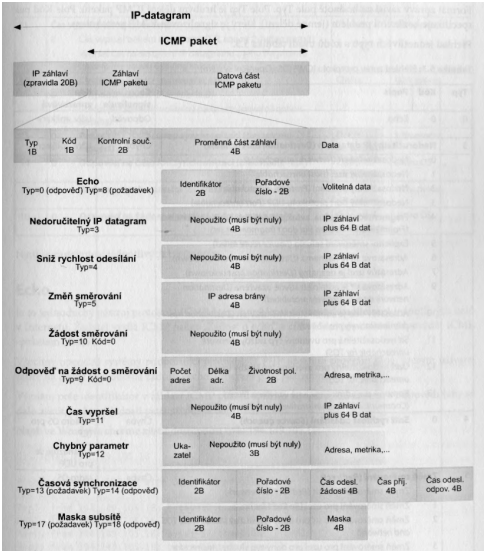
– OS většinou nepodporují všechny **zprávy**, směrovače mohou z bezpečnostních důvodů nějaké zahazovat

– **ICMP pakety** obsaženy v paketech IP, záhlaví (8B): typ (1B), kód (1B), kontrolní součet (2B) a proměnná část (4B), a data

Obrázek: Obrázek průvodce 135

CVIČENÍ: zachytávání a inspekce ICMP paketů generovaných programem `ping` nebo `traceroute/tracert`

Protokol ICMP



Protokol ICMP

Echo

- typ 8 (žádost, request) a 0 (odpověď, reply), kód 0
- použití pro **testování dosažitelnosti uzlu** pomocí programu `ping` – měří a vypisuje i čas mezi žádostí a odpovědí, tj. čas k uzlu a zpět (**Round Trip Time, RTT**), a použité TTL
- pole Identifikátor (v proměnné části záhlaví) pro spárování žádosti a odpovědi

CVIČENÍ: zjištění vzdálenosti (počtu směrovačů, hopů) uzlu pomocí programu `ping` se změnou TTL

Protokol ICMP

Čas vypršel (Time exceeded)

- typ 11, kód 0 (TTL = 0 a IP paket bude zahozen) a 1 (IP paket nelze v určeném čase sestavit z fragmentů)
- zahozený/částečný IP paket (prvních 64 B) v datové části ICMP paketu
- použití (kód 0) pro **zjištění cesty** (směrovačů) **k uzlu** pomocí programu `traceroute/tracert`:
  1. na cílový uzel odeslána ICMP žádost Echo nebo UDP datagram (`traceroute`, port lze nastavit) s TTL = 1
  2. první směrovač na cestě signalizuje zahození paketu (sníží TTL na 0)
  3. získání adresy směrovače a změření času od odeslání k přijetí signalizace (čas ke směrovači a zpět, RTT), výpis obojího
  4. toto třikrát, pak s TTL = 2 (zahodí druhý směrovač) atd. až do přijetí ICMP odpovědi Echo nebo signalizace nedoručitelného IP paketu (kód 3) od cílového uzlu

CVIČENÍ: zjištění cesty (směrovačů) k uzlu pomocí programu `traceroute/tracert`, zjištění autonomních systémů na cestě pomocí programu `whois`

Protokol ICMP

Nedoručitelný IP paket (Destination unreacheble)

- typ 3, signalizace odesilateli, pokud paket nemůže být předán dál nebo doručen a je zahozen
- zahozený IP paket (prvních 64 B) v datové části ICMP paketu
- **důvody** (kódy): nedosažitelná síť (0), uzel (1), protokol (2), UDP port (3), fragmentace zakázána, ale nutná pro další přenos (4), neznámá adresátova síť (6), uzel (7) atd.

Další

- **sniž rychlost odesílání** (typ 4, kód 0) – odesilateli signalizuje směrovač, který není schopen IP paket předat dál (je zahlcený)
- **změň směrování** (typ 5, kódy 0-3), **žádost+odpověď o směrování** (typy 9, 10, kód 0) – doporučení změny ve směrovací tabulce odesílatele (pro tento směr) nebo zjištění směrovačů (žádost na všeobecnou adresu, směrovače odpoví)
- ... (mnoho)