VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

GEOLOKACE STANIC V SÍTI INTERNET

GEOLOCATION OF INTERNET HOSTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. MICHAL INGR
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. JIŘÍ BALEJ
SUPERVISOR

BRNO 2011

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student:	Bc. Michal Ingr	***ID:***	78047
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Geolokace stanic v síti Internet

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte současné způsoby hledání fyzické pozice stanice v síti Internet. Zaměřte se na možnosti zjišťování fyzické pozice stanice na základě měření zpoždění. Dále nastudujte dílčí faktory způsobující zpoždění při přenosu paketů mezi stanicemi v IP sítích. Za pomoci některé z nastudovaných metod geolokace, proveďte měření zpoždění v experimentální síti PlanetLab a odhadněte geografickou pozici souboru stanic. Dosažené výsledky srovnejte s očekávanými výsledky zvolené metody.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GUEYE, B.: Constraint-Based Geolocation of Internet Hosts, IMC, 2004. 6s. ISBN 1-58113-821-0
[2] PADMANABHAN, V. N.: An Investigation of Geographic Mapping Techniques for Internet Hosts, SIGCOMM, 2001. 13s. ISBN 1-58113-411-8
[3] BASSETT, E. K.: Towards IP Geolocation Using Delay and Topology Measurements. IMC, 2006. 13 s. ISBN 1-59593-561-4

Termín zadání:	7.2.2011	***Termín odevzdání:***	26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Jiří Balej

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá metodami geolokace stanic v síti Internet, či-li odhadem geografické polohy neznámé stanice, která je do této sítě připojena. Úvodní část práce popisuje metody, které k určování pozice nepotřebují žádná měření v síti. Následující kapitola je věnována příčinám a místům vzniku zpoždění v Internetu, jejich typům a některým obvyklým hodnotám. Dále jsou uvedeny způsoby měření zpoždění a trasy, včetně několika nástrojů k tomu určených. Předposlední část popisuje některé vybrané geolokační techniky založené na měření RTT. Závěrečná kapitola se věnuje praktické ukázce geolokace za použití metody CBG, kdy měření zpoždění proběhlo v experimentální síti PlanetLab.

Klíčová slova

Geolokace, zpoždění, měření RTT, PlanetLab, CBG

Abstract

This master thesis deals with methods of stations' geolocation on the Internet, it means the estimation geographic location of unknown station, which is conected to this network. The introductory part describes the methods for determining position, which don't need any measeruments of the network. The next section is devoted to points, where delay is invoked, to the causes of latency in the Internet, to their types and some usual values. The following part features ways to measure delays and route, including several tools for this purpose. The penulminate section describes some chosen geolocation techniques based on RTT measurement. The final chapter is devoted to practical demonstration geolocation using the CBG method, when the delay measurement was carried out in an experimental PlanetLab network.

Keywords

Geolocation, delay, RTT measurement, PlanetLab, CBG

INGR, M. *Geolokace stanic v síti Internet.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Balej.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Geolokace stanic v síti Internet“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

……..
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Balejovi za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne …… ……..

podpis autora

OBSAH

Úvod ... **13**

1 Geolokace ... **14**

2 Pasivní geolokační techniky ... **15**
2.1 Lokace podle IP adresy ... 15
2.2 Lokace podle DNS ... 17
2.3 Lokace podle Wi-Fi ... 17

3 Zpoždění v Internetové síti ... **20**
3.1 Definice zpoždění ... 20
3.2 Zpoždění v koncových zařízeních ... 20
3.3 Zpoždění v mezilehlých uzlech ... 21
3.4 Zpoždění na přenosových linkách ... 21

4 Měření zpoždění a trasy ... **23**
4.1 ICMP (Internet Control Message Protocol) ... 23
4.2 RTT (Round-Trip Time) ... 24
4.3 Jednocestné zpoždění ... 24
4.4 Program Ping ... 24
4.5 Program Traceroute ... 26

5 Aktivní geolokační techniky ... **27**
5.1 Omezení geolokačních technik ... 27
5.2 Názvosloví ... 27
5.3 GeoPing ... 28
5.3.1 Nearest Neighbor in Delay Space (NNDS) ... 28
5.3.2 Poslední míle ... 30
5.3.3 Předpoklady pro co nejpřesnější geolokaci ... 30
5.4 Shortest Ping ... 30
5.5 Constraint-Based Geolocation (CBG) ... 31
5.5.1 Multilaterace a hranice vzdálenosti ... 31
5.5.2 Určování vzdáleností ... 33
5.5.3 Odhad polohy stanice ... 34
5.5.4 Nadhodnocení a podhodnocení hranic ... 35
5.6 Speed of Internet (SOI) ... 37
5.7 Topology-Based Geolocation (TBG) ... 37

6 Odhad polohy stanice v reálné síti ... **39**
6.1 PlanetLab ... 39
6.1.1 Přístup do PlanetLabu ... 39
6.2 Dataset ... 40
6.3 Měření zpoždění ... 41
6.3.1 Kalibrace ... 41
6.4 Zhodnocení výsledků ... 44

Závěr ... **47**

Literatura a zdroje ... **49**

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1: Výpis programu whois pro IP 77.48.213.31. 16
Obr.2: Výpis programu whois pro IP 88.100.239.95. 16
Obr.3: Výpis programu nslookup. 17
Obr.4: Wi-Fi lokalizace. 18
Obr.5: Zpoždění na komunikační cestě. 20
Obr.6: Výpis programu ping. 25
Obr.7: Výpis programu tracert. 26
Obr.8: Ukázka NNDS: a) rozmístění sond, landmarků a cíle, b) vektor zpoždění DV1, c) vektor zpoždění DV2, d) vektor zpoždění cíle DV' 29
Obr.9: Ukázka techniky Shortest Ping. 31
Obr.10: Hranice vzdálenosti u metody CBG. 32
Obr.11: Graf závislosti vzdálenosti na zpoždění. 34
Obr.12: Odhad polohy metodou CBG. 35
Obr.13: Hranice vzdálenosti: a) nadhodnocení, b) podhodnocení, c) nadhodnocení i podhodnocení 36
Obr.14: Ukázka techniky TBG. 37
Obr.15: Zvolený dataset pro metodu CBG. 40
Obr.16: Hranice vzdálenosti a odhad polohy cíle Erlangen. 43
Obr.17: Skutečná (černá) a odhadnutá (červená) poloha stanic. 44
Obr.18: Výpis programu traceroute pro uzel ve městě Nancy. 45

SEZNAM TABULEK

Tab.1: Nejpoužívanější ICMP zprávy (podle [11]). 23
Tab.2: Vybrané parametry nástroje ping. 25
Tab.3: Výsledky měření pro Erlangen. 42
Tab.4: Chyby při odhadu poloh stanic. 43

SEZNAM ZRATEK

AFRINIC	African Network Information Center
API	Application Programming Interface
APNIC	Asia Pacific Network Information Centre
ARIN	American Registry for Internet Numbers
CBG	Constraint-Based Geolocation
DNS	Domain Name System
GNP	Global Network Positioning
GPS	Global Positioning System
IANA	Internet Assigned Numbers Autority
ICMP	Internet Control Message Protocol
IP	Internet Protocol
LACNIC	Latin America and Caribbean Network Information Centre
LAN	Local Area Network
MAC	Media Access Kontrol
OS	Operating System
RIPE NCC	Réseaux IP Européens Network Coordination Centre
RTT	Round Trip Time
SOI	Speed of Internet
SSH	Secure Shell
STP	Shielded Twisted Pair
TBG	Topology-Based Geolocation
TTL	Time To Live
UTP	Unshielded Twisted Pair
W3C	World Wide Web Consortium

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá tématem geolokačních technik v síti Internet, jinými slovy určováním geografické polohy zařízení (nejčastěji počítače), které je do této sítě připojeno. Nejpoužívanější jsou metody, které využívají znalosti IP adresy hledaného zařízení, v tom případě hovoříme o tzv. IP geolokaci. Ty by se daly rozdělit na techniky založené na manuálně udržovaných databází IP adres s přiřazenými geografickými polohami a na automatizované techniky využívající měření v internetové síti.

V první kapitole je obecně popsán termín geolokace a některá jeho využití. Těmi nejjednoduššími způsoby jsou ty, které k lokalizaci nepotřebují žádná měření v síti, pouze porovnávají dostupné údaje s databází. Jejich podrobný popis následuje v kapitole druhé.

Ve třetí části jsou rozebrány zdroje zpoždění v IP sítích na přenosových linkách, mezilehlých uzlech a koncových stanicích. Pro jednotlivé prvky komunikační sítě jsou uvedeny typy zpoždění, místa vzniku a některé typické hodnoty. V následující kapitole jsou popsány programy, pomocí kterých lze zpoždění měřit.

Pátá část práce se zabývá geolokačními metodami, které ke své činnosti potřebují měření zpoždění v síti a mohou také sloužit k automatizovanému zjišťování polohy v různých aplikacích. Výčet metod jistě není kompletní, zahrnuje však ty nejpoužívanější.

Šestá a poslední kapitola obsahuje praktickou část diplomové práce. Po seznámení se s geolokačními metodami jsem zvolil techniku CBG, pomocí které jsem se pokusil zjistit polohu stanice. Tato metoda ke své činnosti vyžaduje sadu bodů se známou polohou, od kterých měření probíhá, proto experiment proběhl v rámci sítě Planetlab, která takovéto uzly poskytuje.

1 GEOLOKACE

Geolokace je výraz pro určení geografické polohy počítače, notebooku, mobilního telefonu či jiného zařízení, které je připojeno do sítě Internet. Nalezení fyzické pozice hledaného zařízení je základním stavebním kamenem pro celou řadu služeb a aplikací, pro které je znalost polohy nezbytná. Její přesné určení nemusí být vždy jednoduché a představuje řadu problémů.

Nejjednodušší způsoby spočívají v porovnávání dostupných údajů, například IP adresy, s nějakou databází. Ty mohou být komerční i veřejně přístupné, poskytují však většinou hrubý odhad polohy stanice, téměř vždy jsme díky nim schopni určit alespoň zemi, ve které se hledané zařízení nachází. Jiné metody mohou zahrnovat aktivní měření v internetové síti a odhadnutí polohy hledané stanice, například na základě změřeného zpoždění [1].

Počet uživatelů Internetu se neustále zvyšuje a tak se také stále zvyšuje zájem o geolokační odvětví, zejména ze strany vědecké a obchodní. Existuje řada odvětví a aplikací, kde geolokace nachází uplatnění. Hodí se například pro online reklamu. Internet je ideální reklamní plochou a vzhledem ke své rozsáhlosti nastává potřeba zaměřit reklamu na určitou cílovou skupinu, například zobrazovat reklamní bannery firem z okolí, ve kterém se uživatel právě nachází. Další využití může být při vyhledávání v Internetu, kdy dostaneme odpovědi v jazyce odpovídající dané země, nebo při hledání spojů MHD, kdy rovnou dostaneme nabídku pro město, ve kterém se právě nacházíme. V neposlední řadě můžeme nalézt uplatnění z hlediska bezpečnosti. Například při nakupování na Internetu při placení kreditní kartou, kdy si uživatel zvolí oblast pro používání své karty apod.

2 PASIVNÍ GEOLOKAČNÍ TECHNIKY

Jedná se o způsoby geolokace, které nevyužívají žádná měření v síti, pouze porovnávají veškerá dostupná data s nějakou databází.

2.1 Lokace podle IP adresy

Určení pozice na základě IP adresy patří k nejjednodušším způsobům. IP adresa je dostupná snad vždy (resp. veřejná IP adresa brány přes kterou se zařízení připojuje k Internetu), proto pokud nemáme nic lepšího, použijeme alespoň ji. Tato metoda porovnává IP adresu s databází organizace pro přidělování adres - IANA, resp. s některým z jejích koordinačních středisek [2]:

- RIPE NCC pro přidělování adres v Evropě
- APNIC pro přidělování adres v Asii a Pacifiku
- AFRINIC pro přidělování v Africe
- ARIN pro přidělování adres v Severní Americe
- LACNIC pro přidělování v Latinské Americe

V těchto databázích jsou uloženy údaje o organizacích a uživatelích, jejich IP adresy a kontaktní údaje, přičemž za správnost těchto dat jsou odpovědní správci organizací, které mají dané IP adresy přiděleny[3]. Na obr.1 je znázorněna ukázka získání informací o IP adrese 77.48.213.31 pomocí programu *whois* v operačním systému Ubuntu.

```
zash@zash-laptop:~$ whois 77.48.213.31
% This is the RIPE Database query service.
% The objects are in RPSL format.

% Information related to '77.48.213.0 - 77.48.214.255'

inetnum:        77.48.213.0 - 77.48.214.255
netname:        ALFSERVIS-NET
descr:          Alf servis, s.r.o.
country:        CZ
admin-c:        JS2266-RIPE
tech-c:         JS2266-RIPE
status:         ASSIGNED PA
mnt-by:         SLOANE-MNT
mnt-lower:      SLOANE-MNT
source:         RIPE # Filtered
```

```
person:         Jaromir Sebela
address:        Alf servis, s.r.o.
address:        Okruzni 17
address:        Blansko
address:        678 01
address:        The Czech Republic
phone:          +420 515 532600
phone:          +420 603 259683
fax-no:         +420 515 532600
e-mail:         jaromir.sebela@alfservis.cz
nic-hdl:        JS2266-RIPE
mnt-by:         ALFSERV-MNT
source:         RIPE # Filtered

% Information related to '77.48.0.0/16AS29113'

route:          77.48.0.0/16
```

Obr.1: Výpis programu whois pro IP 77.48.213.31.

Z výpisu je mimo jiné patrné, že daná IP adresa je registrovaná na firmu Alf servis, s.r.o., která se nachází ve městě Blansko, ulici Okružní, číslo domu 17. Zdá se, že máme velmi přesné informace o poloze hledané stanice, ale pozor, tyto údaje mohou být někdy zavádějící. Podívejme nyní se na výpis *whois* pro IP adresu 88.100.239.95, který je zobrazen na obr.2.

```
zash@zash-laptop:~$ whois 88.100.239.95
% This is the RIPE Database query service.
% The objects are in RPSL format.
% Information related to '88.100.239.0 - 88.100.239.255'

inetnum:        88.100.239.0 - 88.100.239.255
netname:        NEXTEL-XDSL
descr:          XDSL NETWORK-ADSL
country:        CZ
admin-c:        HVJI1-RIPE
tech-c:         HVJI1-RIPE
status:         ASSIGNED PA
mnt-by:         AS5610-MTN
source:         RIPE # Filtered

person:         Jiri Hvezda
address:        Telefonica O2 Czech Republic, a.s.
address:        Za Brumlovkou 2
address:        Prague 4 - 140 22
address:        The Czech Republic
phone:          +420 2 84084222
e-mail:         jiri.hvezda@o2.com
e-mail:         jiri.hvezda@ct.cz
nic-hdl:        HVJI1-RIPE
source:         RIPE # Filtered
```

Obr.2: Výpis programu whois pro IP 88.100.239.95.

Jak je vidět, adresa patří společnosti Telefonica O2 Czech Republic, a.s., s adresou v Praze 4. Skutečná poloha stanice se však nachází asi o 180km dál - kousek od Brna. Z uvedeného tedy vyplývá, že není zaručeno, že všechny IP adresy mají odpovídající a správné záznamy a je na majiteli dané IP adresy, jaké údaje do databáze uložil.

2.2 Lokace podle DNS

Dalším způsobem, jak můžeme určit polohu stanice, je využití systému DNS. Tento systém slouží pro překlad IP adres na doménová jména (protože IP adresy jsou pro člověka těžko zapamatovatelné) a naopak, tzv. reverzní překlad, a právě toho se využívá při odhadu pozice hledané stanice. Takový příklad je zobrazen na obr. 3, kde je pro reverzní překlad použit program *nslookup* v operačním systému Ubuntu [4].

```
sudo nslookup 147.229.9.14
Server:         213.46.172.36
Address:        213.46.172.36#53

Non-authoritative answer:
14.9.229.147.in-addr.arpa       name = cache.fit.vutbr.cz.
```

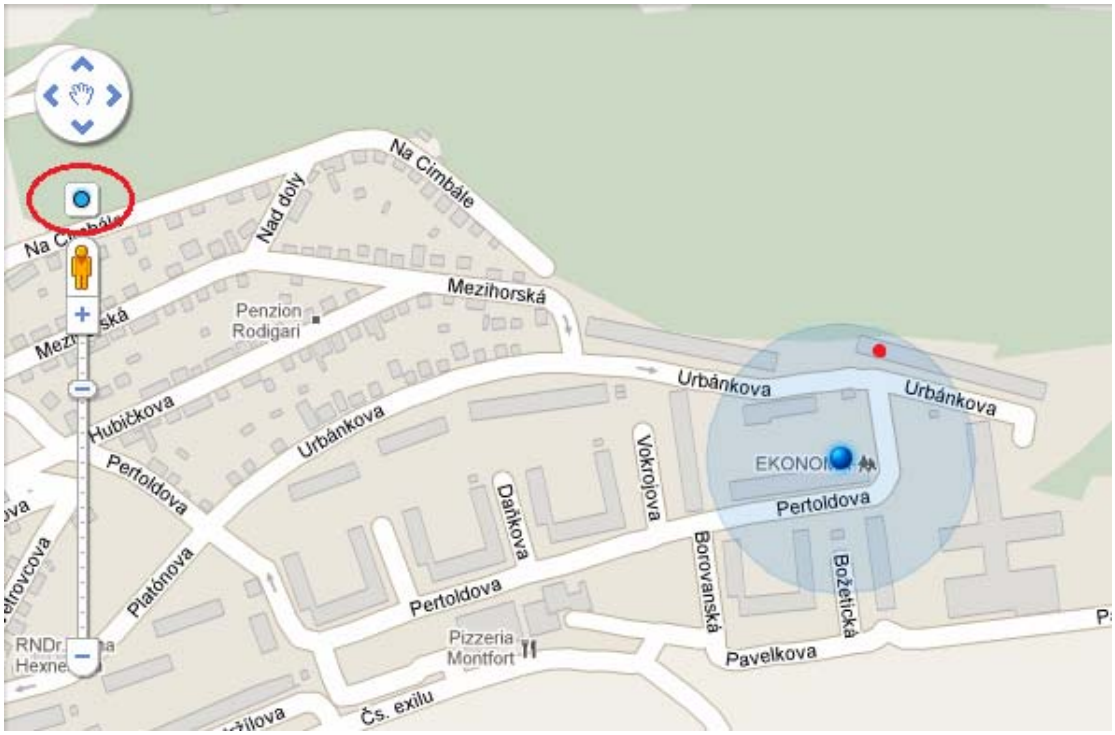
Obr.3: Výpis programu nslookup.

První je uvedena IP adresa serveru, na který byl dotaz odeslán a port (53 – pro TCP i UDP protokol), který systém DNS používá. Nás však zajímá položka *name*, z ní můžeme vyčíst, že se stanice nachází v síti VUT v Brně, Fakultě informačních technologií. Touto metodou jsme tedy většinou schopni určit alespoň zemi či dokonce město, kde se stanice nachází. Její velkou nevýhodou je ale to, že reverzní záznam není povinný, a proto jím mnoho IP adres vůbec nedisponuje a také není definován způsob pojmenování doménových jmen, takže někdy podle názvu nejsme schopni určit polohu stanice.

2.3 Lokace podle Wi-Fi

Další možností lokalizace je pomocí Wi-Fi, je-li přes něj stanice připojená. Takový příklad je zobrazen na obr. 4, kde je použit internetový prohlížeč Firefox a aplikace Mapy Google. Modře je znázorněn přístupový bod, červeně skutečná poloha stanice. Firefox si načte všechny přípojné body v dosahu (jejich jména, MAC adresy, síly signálu) a použije

je ke geolokaci tím způsobem, že získaná data porovná s databází Wi-Fi přípojných bodů. Firefox k tomu využívá databázi Googlu, která patří k jedné z největších.



Obr.4: Wi-Fi lokalizace.

Pro geolokaci na webové stránce stačí zavolat funkce připravovaného standardu W3C – Geolocation API Specification. Například, pokud počítač vidí Wi-Fi síť s názvem „doma“ a MAC adresou „00-15-AF-5E-8B-CF“ odešle následující požadavek:

```
{
 "version": "1.1.0",
 "wifi_towers": [
  {
   "mac_address": "00-15-af-5e-8-cf",
   "signal_strength": -49,
   "ssid": "doma"
  }
 ]
}
```

Protokol obsahuje pouze hlavičku s číslem verze a údaje o daném přípojném bodu, nikde v něm nefiguruje IP adresa, použije totiž tu, ze které mu požadavek dorazí. Odpovědí je:

```
{"location":
{ "latitude":50.087811,
 "longitude":14.42046,
 "accuracy":150.0 },
access_token":"2:Uc6Y_rWERbO8rpJD:_JMopVcxG5HLM-UN"
}
```

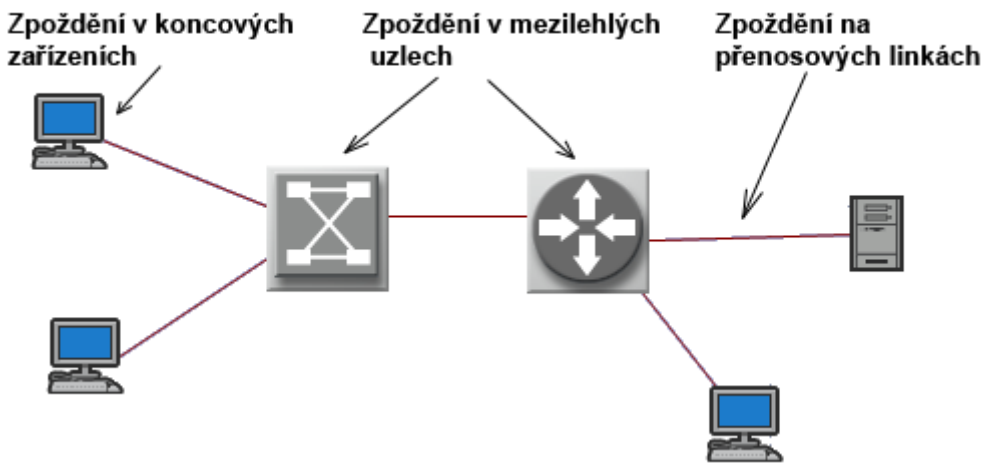
Jsou to údaje o zeměpisné délce a zeměpisné šířce hledané stanice, jejich rozptyl a poslední položkou je Googlem přidělený identifikátor, kterým by byly označeny případné další požadavky prohlížeče o geolokaci. Jak je vidět, tak lokalizace pomocí Wi-Fi je velmi přesná (v tomto případě uvedených 150m), což je mimo jiné také způsobeno tím, že má Wi-Fi omezený dosah. Ovšem hlavním kritériem pro co nejpřesnější určení polohy je, stejně jako při určování polohy pomocí IP adresy, kvalita databáze, se kterou se údaje porovnávají. Jak bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, Google disponuje jednou z největších a nejpřesnějších databází, která je také samoopravovací. Například, kdybychom odeslali požadavek, který by obsahoval současně jeden bod z Prahy a dva z Brna, bude ten pražský ignorován, protože ví, že Wi-Fi tak velký dosah nemá. Pokud by se ale situace opakovala několikrát, systém by si „uvědomil“, že onen bod se již v Praze nenachází a aktualizoval by jeho polohu na Brno[5].

3 ZPOŽDĚNÍ V INTERNETOVÉ SÍTI

3.1 Definice zpoždění

Zpoždění doba způsobená zdržením proti předpokládanému času. V internetové síti je to čas, který paket stráví na cestě od odesílatele k příjemci. Zpoždění, nebo také latence, vzniká na jednotlivých částech komunikačního vedení (viz obr. 5), má různou velikost a charakter. Jeho hodnota je závislá na několika faktorech, jakými jsou například přenosová rychlost linek na cestě a jejich momentální zatížení, geografická vzdálenost zdrojové a cílové stanice, výkonnost a aktuální zatížení mezilehlých uzlů.

Obecně můžeme zpoždění rozdělit na deterministickou a stochastickou část. Deterministická část je neměnná a tvoří pouze minimální hodnotu z celkového zpoždění. Naproti tomu stochastická část je proměnlivá, závisí na aktuálním stavu sítě a tvoří hlavní část zpoždění [6].



Obr.5: Zpoždění na komunikační cestě.

3.2 Zpoždění v koncových zařízeních

Koncovým zařízením rozumíme zdroj a cíl přenášeného paketu, jako jsou například počítače a servery. Zdrojové zařízení připravuje zprávu pro přenos, přidělí jí svoji adresu a adresu příjemce a zabalí jí do paketu. Naopak cílové zařízení musí provést opačný postup. Tento proces samozřejmě zabere nějaký čas a vzniká tak zpoždění – paketizační a v odchozích frontách.

Paketizační zpoždění, jak je uvedeno v předchozím odstavci, je doba nutná k vytvoření paketu ve zdrojové stanici. Je závislá na rychlosti, kterou počítač dokáže zpracovat danou informaci a je ve většině případů zanedbatelná [6].

Zpoždění v ochozích frontách se uplatňuje nejen ve zdrojových stanicích, ale také v mezilehlých prvcích, jako jsou například směrovače a přepínače. Toto zpoždění má proměnnou velikost, protože závisí na aktuálním zatížení prvku, ale dá se aktuálně zjistit podle celkové velikosti paketu nacházejícího se ve frontě a rychlosti přenosové linky [7].

3.3 Zpoždění v mezilehlých uzlech

Mezilehlý uzel je jakékoliv aktivní zařízení mezi zdrojovou a cílovou stanicí. Tato zařízení vykonávají mnoho různých funkcí, ale mezi ty nejdůležitější patří směrování a přepínání datových jednotek, tzn. jejich přeposílání nejvýhodnější cestou k cíli. Tyto operace opět zaberou nějaký čas a vzniká tak několik dílčích zpoždění.

Zpoždění ve vstupní frontě je doba, kterou informace stráví ve vstupním bufferu (vyrovnávací paměti) uzlu, dokud nejsou načteny všechny nezbytné bity [6].

Zpoždění ve výstupní frontě, analogicky, je doba, kterou informace stráví ve výstupním bufferu aktivního prvku před jejich odesláním[6].

Dalším typem zpoždění vznikajícím v mezilehlém prvku je doba nutná ke zpracování informace. Je to čas, který prvek potřebuje k přesunu paketu z vstupní fronty na výstup. Tato hodnota je závislá na výkonnosti daného zařízení a prováděných operací, jakými mohou být směrování, filtrování portů nebo překlad adres. Toto zpoždění se zvyšuje s narůstajícím zatížením prvku. Typické hodnoty zpoždění v aktivních prvcích se pohybují v tomto rozmezí [6]:

- opakovač – zanedbatelné
- přepínač – 1 až 10 μs
- směrovač – 10 až 100 μs

3.4 Zpoždění na přenosových linkách

Toto zpoždění má největší význam z hlediska geolokace stanic na základě měření latence [8]. Přenosové kabely nejsou vedeny nejkratší cestou k cíli, ale jsou pokládány na vhodně zvolených místech, jako například podél silnic a dálnic či železničních tratí, což zvyšuje dobu doručení paketu k cíli [6]. Další navýšení této doby může být způsobeno

směrováním, protože směrovač ne vždy vybere nejkratší cestu, ale například tu s nejvyšší rychlostí. Kromě toho je zpoždění ovlivněno také přenosovou technologií, což ovlivňuje hlavně přenosovou rychlost linky.

Zpoždění způsobené rychlostí šíření signálu je doba, která určuje, jak dlouho trvá přenos signálu z jednoho konce kabelu na druhý. Je závislá na druhu použitého média (nejčastěji metalický a optický kabel), ale hlavně na délce fyzické trasy. Skutečná délka je však je však výrazně vyšší než je vzdálenost vzdušnou čarou, na což se při geolokaci musí brát zřetel [9].

Metalický kabel je nejčastěji používán v LAN a v přístupových sítích. Původně byly používány koaxiální kabely, ale ty jsou dnes již nahrazeny UTP nebo STP kabely, takže dosažitelná rychlost je 100 Mbit/s či v řádech Gbit/s při použití všech čtyř párů. Uváděné zpoždění v těchto kabelech se pohybuje kolem 6,5 μs/km [8].

Optický kabel se používá hlavně v transportních sítích, které propojují místa, kde je potřebná vysoká přenosová rychlost na dlouhé vzdálenosti. Uvedené zpoždění pro toto médium se pohybuje kolem 5 μs/km [6].

4 MĚŘENÍ ZPOŽDĚNÍ A TRASY

Nástrojů pro měření zpoždění a trasování existuje mnoho, od online appletů až po hardwarové zařízení. Měřit lze zpoždění jednosměrné nebo obousměrné (RTT), každé z nich má své výhody i nevýhody. Před samotným měřením je dobré si rozmyslet co je jeho cílem a poté vybrat vhodný nástroj. Důležité je, aby cílová stanice, vůči které měření provádíme, daný nástroj podporovala. To samé platí o mezilehlých uzlech sítě, ne všechny musí umět požadovanou zprávu přenést. V následujícím výpisu budou popsány pouze základní nástroje pro měření zpoždění a trasování.

4.1 ICMP (Internet Control Message Protocol)

ICMP je protokol internetové vrstvy komunikačního modelu TCP/IP definovaný specifikací RFC 792. Umožňuje signalizaci chybových stavů a přenos řídících informací mezi uzly a směrovači sítě TCP/IP. K jeho základním funkcím patří:

- Testování dostupnosti a stavu cílového uzlu sítě,
- řízení zahlcení sítě a toku paketů,
- aktualizace směrovacích tabulek uzlů od IP směšovačů,
- odesílání masky podsítě.

Mimo to se dá také využít pro měření zpoždění v IP sítích pomocí programu *ping* (viz kapitola 4.3.1). V některých případech jsou však ICMP zprávy z bezpečnostních důvodů ignorovány, což při měření zpoždění vede k zásadním chybám [10]. Některé nejčastěji používané ICMP zprávy zobrazuje tabulka 1.

ICMP zpráva	**Popis**
Echo request	Požadavek ke zjištění dostupnosti IP uzlu v síti.
Echo reply	Odpověď na požadavek.
Destination unreachable	Informace o nedostupnosti cíle.
Source quench	Žádost o snížení rychlosti odesílání datagramů.
Redirect	Informace o přesměrování na lepší trasu k cíli.
Time exceeded	Vypršení platnosti hodnoty TTL IP datagramu.

Tab.1: Nejpoužívanější ICMP zprávy (podle [11]).

4.2 RTT (Round-Trip Time)

RTT je čas, který zabere vyslání signálu ze zdrojové stanice, doputování k příjemci, jeho zpracování zde, odeslání odpovědi zpět ke zdroji a jeho přijetí. Na tuto dobu má vliv zejména délka trasy a její zatížení. Může také dojít k výpadku linky, kdy se hodnota RTT neúměrně zvyšuje, protože data musí být směrována jinou cestou, což negativně ovlivňuje případné následné odvozování jednocestného zpoždění. K dalšímu navýšení může dojít z toho důvodu, že se k měření RTT používají zprávy protokolu ICMP a ty mají ve směrovačích nízkou prioritu nebo mohou být zcela ignorovány, takže zpoždění není možné změřit vůbec [12].

Z uvedeného vyplývá, že měřením RTT dostaneme zpoždění odpovídající cestě k cíli a zpět, tedy asi dvojnásobnou hodnotu zpoždění jednocestného. To dostaneme podělením hodnoty RTT dvěma. Přesnou hodnotu pro jeden směr však nedostaneme, protože trasa, po které se nám vrací odpověď nemusí být stejná jako ta, po které jsme odeslali požadavek.

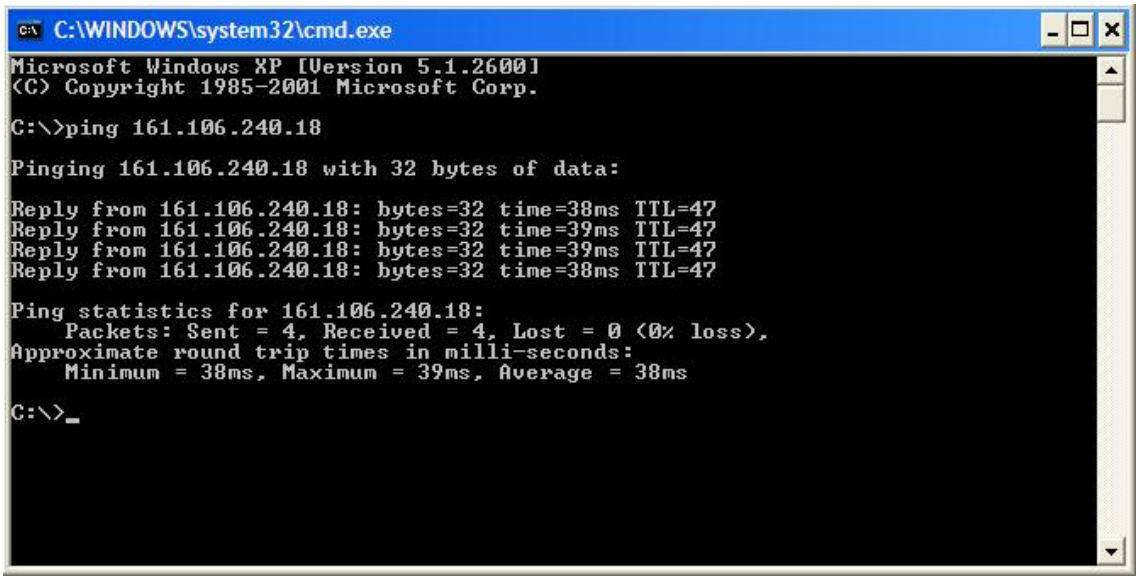
Hlavní výhodou měření RTT je, že nám k jejímu získání stačí použít jedinou stanici. Naopak nevýhodou je nepřesná hodnota jednocestného zpoždění.

4.3 Jednocestné zpoždění

Jednocestné zpoždění je měřeno ze dvou stanic (zdrojové a cílové), cože je vlastně jeho hlavní nevýhodou, protože k cílové stanici většinou nemáme přístup. Druhou nevýhodou je to, že vyžaduje přesnou časovou synchronizaci obou stanic. Naopak výhodou je získání velmi přesné hodnoty zpoždění pro žádaný směr.

4.4 Program Ping

Ping (anglicky Packet InterNet Groper) je základní nástroj pro měření zpoždění v IP sítích. Je obsažen snad ve všech operačních systémech a spouští se zapsáním příkazu *ping* do příkazové řádky nebo konzole (podle typu používaného operačního systému). Jako parametr se zadává doménové jméno nebo IP adresa stanice, vůči které chceme zpoždění změřit. V operačním systému Windows se po spuštění příkazu odešlou čtyři ICMP dotazy a vypíšou se naměřené hodnoty (viz obr. 6). V OS Linux se naopak zprávy odesílají tak dlouho, dokud nejsou zastaveny uživatelem. Zpoždění je zobrazeno v řádech mikrosekund (v OS Linux) nebo milisekund (OS Windows). Příkaz *ping* může obsahovat i další parametry, díky kterým je možné jeho nastavení změnit (viz tab. 2) [13] [14].



Obr.6: Výpis programu ping.

Jak bylo řečeno, *ping* ke své činnosti využívá zprávy ICMP. Tento protokol je vyžadovanou součástí IP protokolu a každý uzel, který ho má implementovaný, musí ICMP podporovat. Základním účelem je informování zdrojového uzlu o chybách při přenosu datagramu. Chyby mohou vzniknout například tím, že směrovač nemá dostatečný buffer pro přepískání datagramu, musí datagram fragmentovat nebo nemá v tabulce záznam o cílové stanici atd. Program *ping* však ke své činnosti využívá pouze dvě zprávy z toho protokolu a to Echo Request (typ 8, výzva) a Echo Reply (typ 0, odpověď) [15].

Příkaz	**Popis**
ping -t	Provádí test v cyklu dokud nedojde k jeho přerušení (ctrl+c).
ping -a	Překládá IP adresu na DNS jméno.
ping -n	Udává, kolik zpráv Echo request má být odesláno.
ping -l	Udává počet bajtů, které budou odeslány (defaultně 32 bajtů).
ping -f	Velký IP datagram nebude rozdělen routery na několik menších.
ping -i	Nastaví hodnotu TTL v hlavičce IP datagramu.
ping -w	Nastavuje, jak dlouho má příkaz čekat na odezvu.

Tab.2: Vybrané parametry nástroje ping.

4.5 Program Traceroute

Traceroute (v OS Windows *tracert*) slouží k výpisu všech uzlů na trase od zdrojové stanice k cílové (viz obr. 7). Pracuje na principu opakování dotazu *ping* se zvyšující se hodnotou TTL po každém úspěšném odeslání paketu. Cestou k cíli paket prochází jednotlivými uzly sítě (směrovači), v každém z nich je pak hodnota TTL snížena o jedna a paket je poslán dál. V případě, že je hodnota TTL rovna nule a paket není v cílové stanici, je zpráva zahozena a zdrojové stanici se odešle chybová ICMP zpráva. Program využívá těchto zpráv k sestavení tabulky cesty paketu od odesílatele k příjemci. Nevýhoda toho nástroje spočívá v tom, že ne všechny směrovače posílají zpět chybové zprávy [16] [17].

```
Výpis trasy k piranha.ro.vutbr.cz [147.229.2.90]
s nejvýše 30 směrováními:

  1     2 ms     2 ms     2 ms  192.168.1.254
  2     3 ms     2 ms     2 ms  192.168.31.1
  3     3 ms     3 ms     6 ms  sworion-orion.in.alfservis.cz [10.100.171.13]
  4     5 ms     3 ms     3 ms  swkr-swdv84.in.alfservis.cz [10.100.170.2]
  5     7 ms    11 ms     5 ms  10.100.170.177
  6     4 ms     3 ms     4 ms  swmos1.in.alfservis.cz [10.100.170.62]
  7     9 ms     4 ms     4 ms  93.99.21.41
  8     4 ms     4 ms     4 ms  v240.bb2.pop1.brn.sloane.cz [62.240.165.129]
  9     8 ms     8 ms     7 ms  v103.bb1.pop1.sve.sloane.cz [62.240.161.146]
 10     8 ms     8 ms     8 ms  nix4-10ge.cesnet.cz [194.50.100.191]
 11    14 ms    13 ms    14 ms  gw-ant.net.vutbr.cz [147.229.252.19]
 12    13 ms    13 ms    13 ms  hp-ant.net.vutbr.cz [147.229.253.235]
 13    13 ms    13 ms    14 ms  hp-ant9.net.vutbr.cz [147.229.254.155]
 14    12 ms    12 ms    11 ms  piranha.ro.vutbr.cz [147.229.2.90]

Trasování bylo dokončeno.
```

Obr.7: Výpis programu tracert.

5 AKTIVNÍ GEOLOKAČNÍ TECHNIKY

Jedná se o techniky, kdy je poloha stanice odhadnuta pomocí dat získaných měřením při přenosu paketu v internetové síti. Všechny následně zde popisované metody, které se používají k odhadu umístění hledané stanice, využívají měření zpoždění či topologické vlastnosti sítě. Rovněž se spoléhají na velkou skupinu referenčních bodů, tzv. „landmarků“, což jsou koncové stanice nebo uzly v sítí, jejichž poloha je předem přesně známa a od kterých se pak měření a následná lokalizace provádí. Přesnost a náročnost uvedených metod se od sebe výrazně liší a s tím je také spojeno jejich uvedení do praxe.

Tyto metody mohou být využity k plně automatizovanému určování pozice hledané stanice. Jediné co musíme provést manuálně je přiřazení geografických souřadnic ke známým stanicím a jejich IP adresy, takže většinou nejsou nutné žádné další zásahy ze strany člověka, kromě občasné údržby a metody jsou tak schopné pracovat teoreticky neomezeně dlouho [1].

5.1 Omezení geolokačních technik

Základní omezení geolokačních technik vyplývá z faktu, že mnoho uživatelů internetové sítě je v dnešní době „schováno“ za proxy servery či firewally, které patří poskytovateli jejich internetového připojení. Není tedy výjimkou, že IP adresa uživatele odpovídá IP adrese uzlu, který slouží k jeho připojení do sítě. V některých případech nemá tento fakt příliš velký vliv na určení polohy a to, pokud se uživatel nachází nedaleko tohoto proxy serveru, takže chyba při určení polohy se může pohybovat v řádech stovek metrů. V opačném případě ovšem může jít o vzdálenost až stovky kilometrů, což naprosto znehodnotí výsledné údaje [18]. Těmto problémům dokáží některé geolokační aplikace předcházet, to ale není případ těch, které budou blíže rozebrány v následujících kapitolách.

5.2 Názvosloví

Před samotným popisem geolokačních technik je dobré uvést několik výrazů, které jsou s nimi úzce spjaty a vyskytují jak v pracích zabývajících se geolokací, ze kterých jsem čerpal, tak i v té mé:

- Target (T) – nebo-li cíl. Jedná se o stanici, jejíž poloha je nám neznámá a snažíme se ji určit.

- Landmark (L) – nebo také referenční bod. Je to stanice jejíž polohu známe (její geografické souřadnice). Landmarky mohou být buď aktivní nebo pasivní. Aktivní jsou ty, které jsou schopny měřit hodnotu RTT pokud je to nutné. Naopak pasivní nemohou.
- Probe (S) – sonda. Stejně jako u landmarku polohu sondy známe. Slouží k měření zpoždění k referenčním bodům nebo cílovým stanicím.
- Dataset – soubor stanic. Jedná se o skupinu landmarků a sond, které využíváme k určení polohy cílové stanice, ta však součástí datasetu není.

5.3 GeoPing

GeoPing určuje polohu stanice tím, že využívá zpoždění v sítí a geografické vzdálenosti, tzn. že stanice s podobnou dobou zpoždění jsou geograficky umístěny blízko sebe.

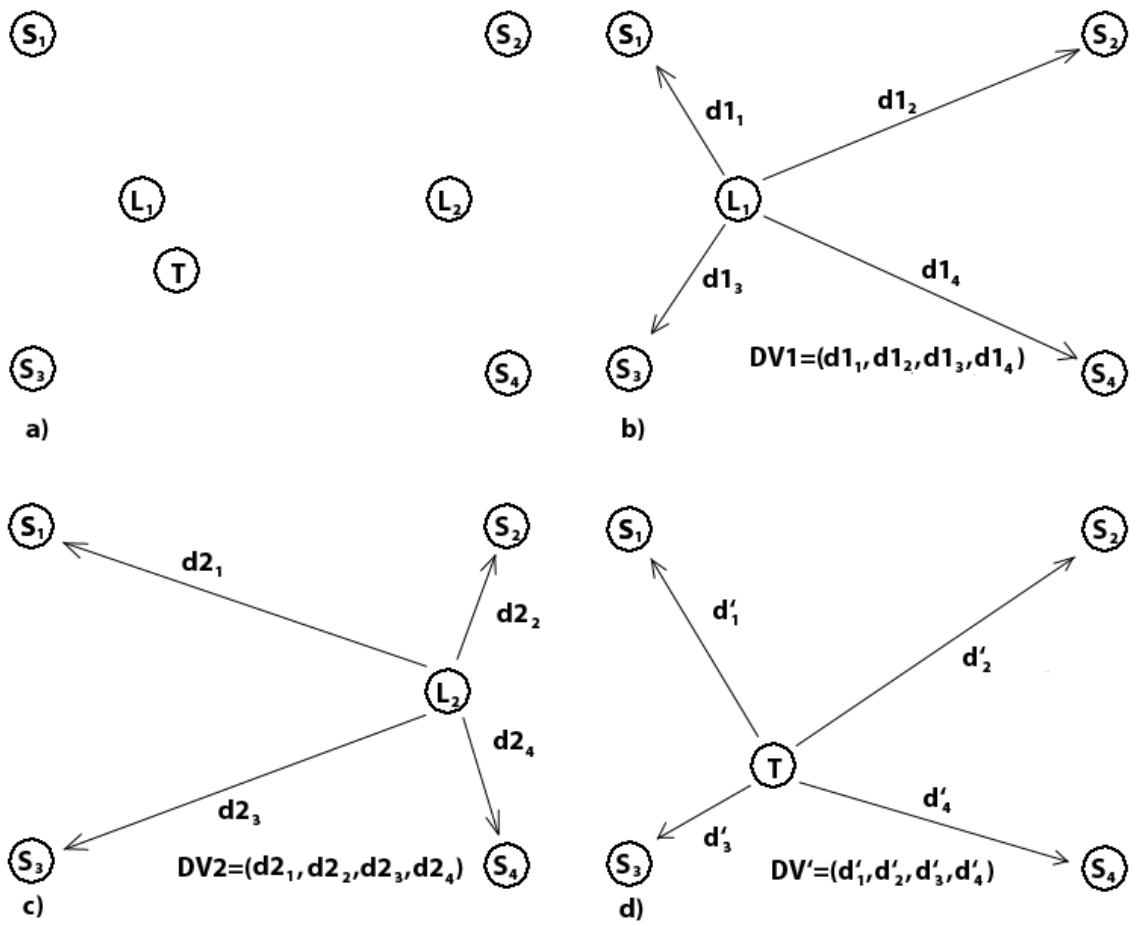
Tato metoda odhaduje pozici stanice za pomocí datasetu, který tvoří několik málo sond, či-li stanic, od kterých je prováděno měření zpoždění, a velké množství referenčních bodů. Jako výsledný odhad pozice hledané stanice dostaneme de facto geografické souřadnice některého z landmarků, protože pozice cíle je přiřazena pouze pozici referenčního bodu nacházejícího se v tomto datasetu. Tato vlastnost je ovšem také hlavním zdrojem nepřesnosti uvedené metody. Je to z toho důvodu, že landmark, jehož poloha byla vybrána jako nejvíce shodná s cílovou stanicí, se může i tak nacházet velmi daleko od skutečné pozice cíle. Tato chyba se v podstatě nedá eliminovat, protože se nikdy nenajde cíl, jehož poloha by se shodovala s polohou některého z referenčních bodů v datasetu. Může se pouze zmírnit tím, že zvolíme co nejvyšší počet landmarků a vhodné rozmístění sond. Přesného odhadu, v rámci několika kilometrů, se dá dosáhnout pouze pokud má hledaná stanice podobnou geografickou polohu jako některý z referenčních bodů [18] [19].

5.3.1 Nearest Neighbor in Delay Space (NNDS)

Termín NNDS, či-li tzv. nejbližší soused v prostoru zpoždění, je základem metody GeoPing. Vychází z poznatků, že stanice s podobnou dobou zpoždění, vůči nějakému známému bodu (landmarku), jsou umístěny blízko sebe [18].

Obecně GeoPing funguje tak, že vytváří jakousi mapu zpoždění, která obsahuje souřadnice landmarků, dále tzv. vektor zpoždění *DV* (tj. vektor mezi sondami a referenčními

body, resp. hodnoty zpoždění mezi nimi) a tzv. vektor zpoždění cíle *DV'* (tj. vektor mezi sondami a cílovou stanicí), které vzájemně porovnává. Poté se vybere takový vektor zpoždění, který je co nejvíce podobný vektoru zpoždění cíle. Jeho geografická poloha (resp. poloha landmarku, kterému patří příslušný vektor *DV*) je výslednou pozicí hledané stanice. Pokud chceme dosáhnout rozumných výsledků, je třeba při vytváření mapy zpoždění použít co nejvyšší počet referenčních bodů a do vektorů zpoždění uvést nejmenší hodnoty zpoždění, získané jejich opakovaným měřením [18] [19] (viz Obr. 8).



Obr.8: Ukázka NNDS: a) rozmístění sond, landmarků a cíle, b) vektor zpoždění DV1, c) vektor zpoždění DV2, d) vektor zpoždění cíle DV'

Konkrétní případ ukazuje obr. 8. V části a) jsou zobrazeny dva referenční body, cíl a vhodné rozmístění sond. Důležité je, aby sondy mely dostatečné rozestupy a netvořily shluky, docházelo by jinak ke zkreslování hodnot. V části b) je vidět, jak vypadá vektor zpoždění DV1, který obsahuje hodnoty RTT $d1_1$, $d1_2$, $d1_3$, $d1_4$ naměřené vůči jednotlivým sondám.

Část c) zobrazuje vektor zpoždění DV2 a jeho hodnoty naměřené od druhého referenčního bodu. V poslední části d) je vektor zpoždění cíle DV'. Z obrázku je patrné, že nejbližším sousedem v prostoru zpožděni (NNDS) bude, vůči cílové stanici T, referenční bod L_1, protože má nejpodobnější vektor zpoždění (DV1) s vektorem zpoždění cíle (DV'). Za výslednou polohu cílové stanice T tedy bude označena pozice landmarku L_1.

5.3.2 Poslední míle

Pod pojmem poslední míle si můžeme představit např. trasu od telefonní ústředny k cílové stanici (připojení pomocí dial-up linky). Pokud je tato cesta tvořena nevhodným připojením, jako je např. výše zmíněný pomalý dial-up, přetíženou linkou apod., dochází na ní k neúměrnému zvyšování hodnot RTT a tím i ke zkreslení celého měření. Jestliže tento fakt zjistíme, je vhodné nahradit tuto stanici např. posledním směrovačem na trase k ní [18].

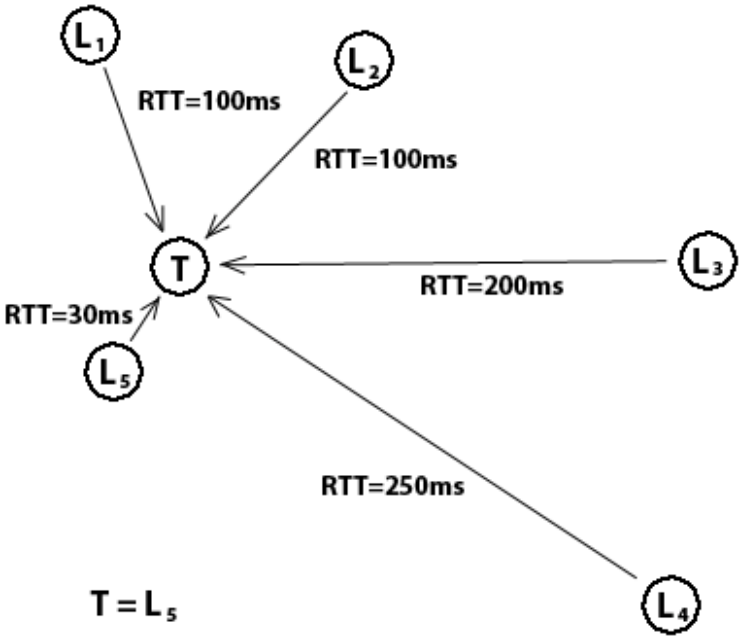
5.3.3 Předpoklady pro co nejpřesnější geolokaci

Podle [18] je nutné dodržovat následující pravidla:

- Počet sond 7 až 9.
- Vhodné rozmístění sond, tzn. nevytváření jejich shluků.
- Co nejvyšší počet referenčních bodů.
- Jako referenční body použít takové stanice, které jsou dobře dostupné, tzn. na cestě k nim nedochází ke zbytečnému směrování nebo nemají pomalé připojení.
- Opakovat měření RTT a ze získaných hodnot použít tu nejnižší.

5.4 Shortest Ping

Shortest Ping je pravděpodobně nejjednodušší metodou založenou na měření zpoždění. Funguje tak, že se měří zpoždění od všech referenčních bodů k cíli. Po vyhodnocení toho měření je geografická poloha cíle přiřazena k landmarku, který je k němu nejblíže z hlediska hodnoty RTT, tzn. má nejmenší hodnotu zpoždění (viz obr. 9) [21]. Tato metoda byla původně používána ke zlepšení přesnosti složitějších technik, ale jak zjistili v [20] , tak poskytuje výsledky srovnatelné se složitějšími algoritmy.



Obr.9: Ukázka techniky Shortest Ping.

5.5 Constraint-Based Geolocation (CBG)

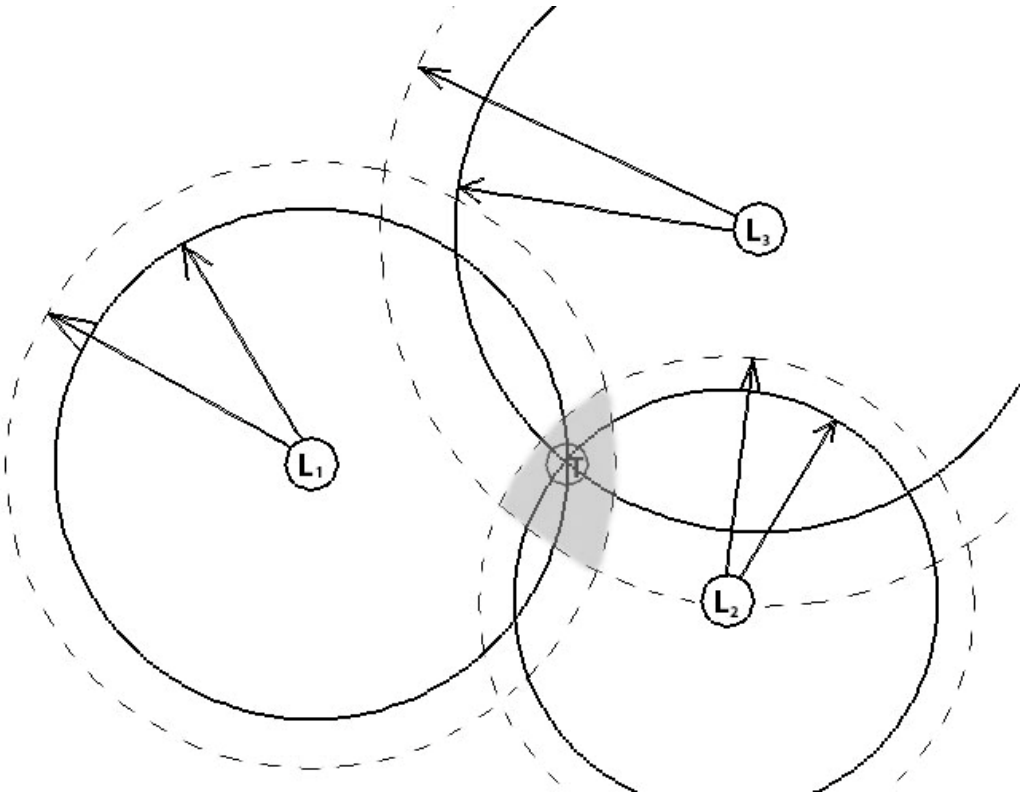
Výše zde uvedené techniky využívaly pozice referenčních bodů jako možnou polohu cílové stanice. To vedlo k diskrétnímu počtu možností pozic. Tato metoda toto omezení překonává a k odhadu polohy neznámé stanice využívá tzv. multilaterace, což má významově blízko k trilateraci používané u technologie GPS.

Multilaterace je proces odhadování pozice neznámého cíle na základě dostatečného počtu známých bodů, resp. na základě vzdáleností mezi nimi. V případě CBG se jako známých bodů využívá soustava aktivních referenčních bodů. Je důležité, aby byly landmarky opravdu schopny měřit hodnoty RTT. Z nich se následně určí vzdálenosti a dostaneme rozlohu oblasti, kde by se cílová stanice měla pravděpodobně nacházet. V ten moment může být rozhodnuto, jestli je odhadovaná oblast dostatečně přesná či nikoliv. V ideálním případě je metoda schopná určit konkrétní souřadnice cíle [22].

5.5.1 Multilaterace a hranice vzdálenosti

Jak bylo řečeno, hlavní principem metody CBG je převod změřeného zpoždění mezi referenčními body i hledanou stanicí na vzdálenost, která se co nejvíce blíží reálné geografické vzdálenosti mezi nimi. Těmito hodnotami je následně vymezena tvz. hranice

vzdálenosti, což je odhadovaná oblast, ve které by se měl nacházet cíl. Tato hranice se vymezuje pro každý referenční bod zvlášť a vychází z poznatku, že rychlost šíření signálu v optickém vlákně dosahuje asi dvoutřetinové rychlosti šíření světla ve vakuu. Samotná hranice vzdálenosti se pak skládá z horní a dolní hranice [22]. Popsané skutečnosti jsou zobrazeny na obr. 10.



Obr.10: Hranice vzdálenosti u metody CBG.

Dolní hranice

Dolní hranice vychází z předpokladu, že naměřené zpoždění je ideální, tzn. zahrnuje pouze zpoždění způsobené propagací dat optickým vláknem. Jakékoliv další zdroje zpoždění, jako např. zpoždění ve směrovačích, nejsou zahrnuty. To je v praxi ovšem nereálné, a proto musí být tyto nežádoucí zdroje brány v potaz a v celkovém zpoždění obsaženy. Následně je aplikována konstanta pro převod zpoždění na vzdálenost. Vznikne tak dolní hranice vzdálenosti – cíl už nemůže být od landmarku dál [22].

Horní hranice

Všechna nežádoucí zpoždění zahrnutá v horní hranici tvoří tzv. přídavek zpoždění. Ten ovšem v horní hranici započítán není, hodnota zpoždění je tak menší než u dolní hranice.

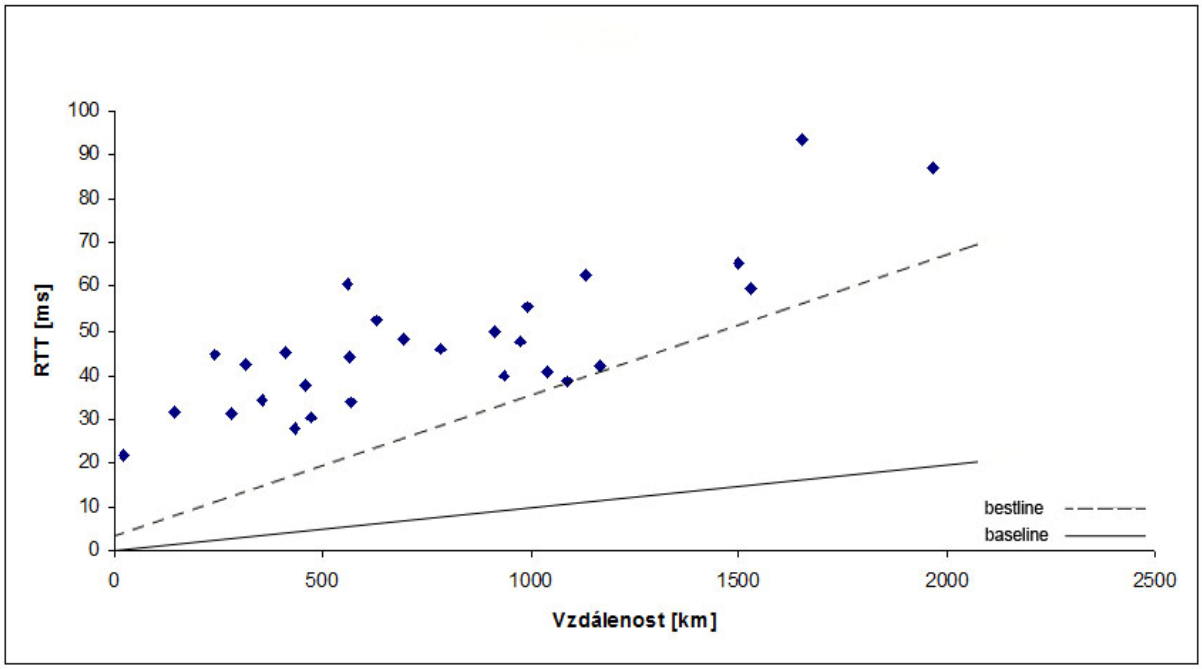
V ideálním případě bude obsahovat pouze propagační zpoždění (zpoždění způsobené přenosovým mediem), bude tak blíže referenčnímu bodu než je tomu v případě dolní hranice a její vzdálenost bude odpovídat skutečné vzdálenosti mezi cílem a landmarkem. Celkový rozdíl mezi horní a dolní hranicí se nazývá nežádoucím zkreslením vzdálenosti a je přímo úměrný velikosti přídavku zpoždění [22].

5.5.2 Určování vzdáleností

Při určování vzdáleností cíle od referenčních bodů, na základě změřeného zpoždění, metoda CBG co nejvíce eliminuje velikost nežádoucího zkreslení zpoždění. Postup pro jeho minimalizaci a následné určení vzdáleností je podle [22] následující:

- Každý referenční bod změří zpoždění vůči ostatním bodům.
- K získaným hodnotám zpoždění přiřadíme geografické vzdálenosti v rámci měřených landmarků a vytvoříme graf závislosti vzdálenosti na zpoždění (viz obr. 11).
- V tomto grafu je vynesena přímka odpovídající ideálním hodnotám poměru vzdálenosti a zpoždění (odvozená z rychlosti šíření dat komunikačním médiem, tj. přibližně 1 ms = 100 km), která je nazvaná „baseline“. Jedná se o horní hranici vyjádřenou směrnicovou rovnicí přímky $y = mx + b$, kde $b = 0$, protože nejsou brány v potaz žádné zkreslující zpoždění a m se vztahuje pouze k rychlosti putování informace komunikačním médiem.
- Z vynesených hodnot v grafu zjistíme nejlepší poměr zpoždění a vzdáleností vůči všem referenčním bodům a také ho vyjádříme směrnicovou rovnicí přímky nazvanou „bestline“. Tato přímka je definována jako $y = m_i x + b_i$, kde b_i značí přítomnost přídavku zpožděni. Velikost m_i odpovídá hodnotě vyjádřené pomocí „bestline“, ta musí ležet pod všemi body v grafu, ale zároveň jim musí být co nejblíže.

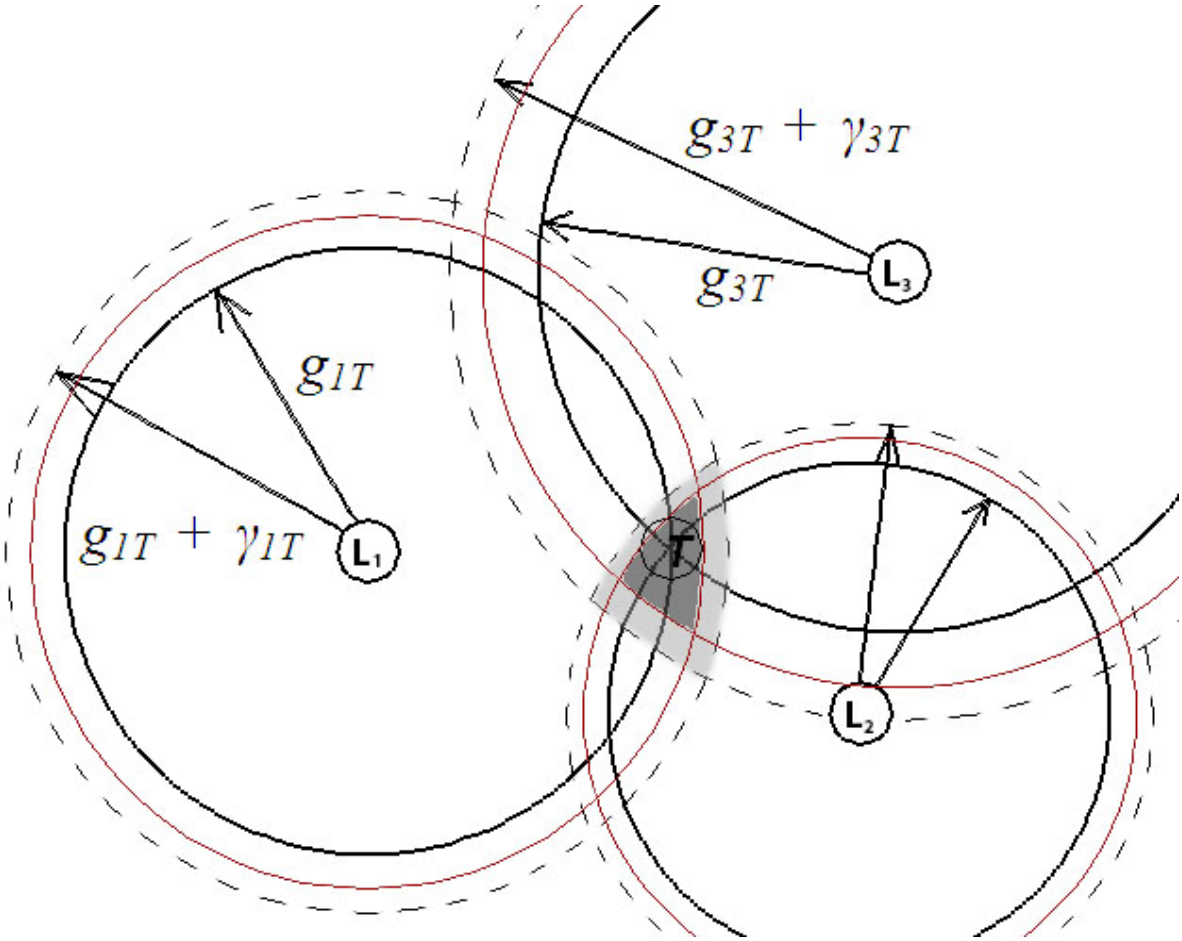
Zde uvedený postup se provádí pro každý referenční bod zvlášť. Zjistíme tak jaké poměry zpoždění a vzdáleností máme uvažovat při určování hranice vzdálenosti, čili jaký koeficient použít pro převod zpoždění (změřeného vůči cíli) na vzdálenost. Metoda CBG umožňuje také automatickou kalibraci, tzn. že referenční body měří zpoždění v určitých intervalech a jsou tak schopny měnit jejich bestline v závislosti na aktuálním zatížení sítě a zpřesňovat odhad polohy cílové stanice [22].



Obr.11: Graf závislosti vzdálenosti na zpoždění.

5.5.3 Odhad polohy stanice

Na obr. 12 máme dataset obsahující tři referenční body a cílovou stanici, jejíž poloha je nám neznámá a snažíme se ji určit. Po ustavení vzdáleností mezi landmarky (viz kap. 5.5.2) si každý referenční bod určí dolní hranici $g_{iT}' = g_{iT} + \gamma_{iT}$ (γ_{iT} značí nežádoucí zkreslení, g_{iT} odpovídá reálné geografické vzdálenosti) a horní hranici, která je od zkreslení zproštěná a je tvořena pouze pomocí g_{iT}. Pokud by se poloha cíle odhadovala jen pomocí horních hranic (zpoždění by odpovídalo skutečné vzdálenosti), tak by stanice ležela v bodě, kde se tyto hranice protnou. Ovšem tyto hranice přesně neznáme a tak v závislosti na nežádoucím zkreslení dostaneme určitý prostor (světle šedá barva v obr. 12), kde by se cílová stanice měla pravděpodobně nacházet [22].



Obr.12: Odhad polohy metodou CBG.

Po následné kalibraci dojde k vytvoření hranice vzdálenosti na základě vypočítané bestline. Čím přesnější bude bestline, tím více se hranice vzdálenosti bude posouvat k referenčnímu bodu a tím víc se bude zmenšovat oblast (tmavě šedá barva v obr. 12), ve které by se cílová stanice měla nacházet, čili odhad polohy bude přesnější. Jako konečná poloha stanice je určen střed výsledné oblasti [23].

5.5.4 Nadhodnocení a podhodnocení hranic

V ideálním případě by se hranice vzdálenosti rovnala dolní hranici, ve skutečnosti ale dochází ke třem variantám určení hranice. Jsou to nadhodnocení, podhodnocení a kombinace obou, tzv. „mismatch“ [22].

Nadhodnocení hranic

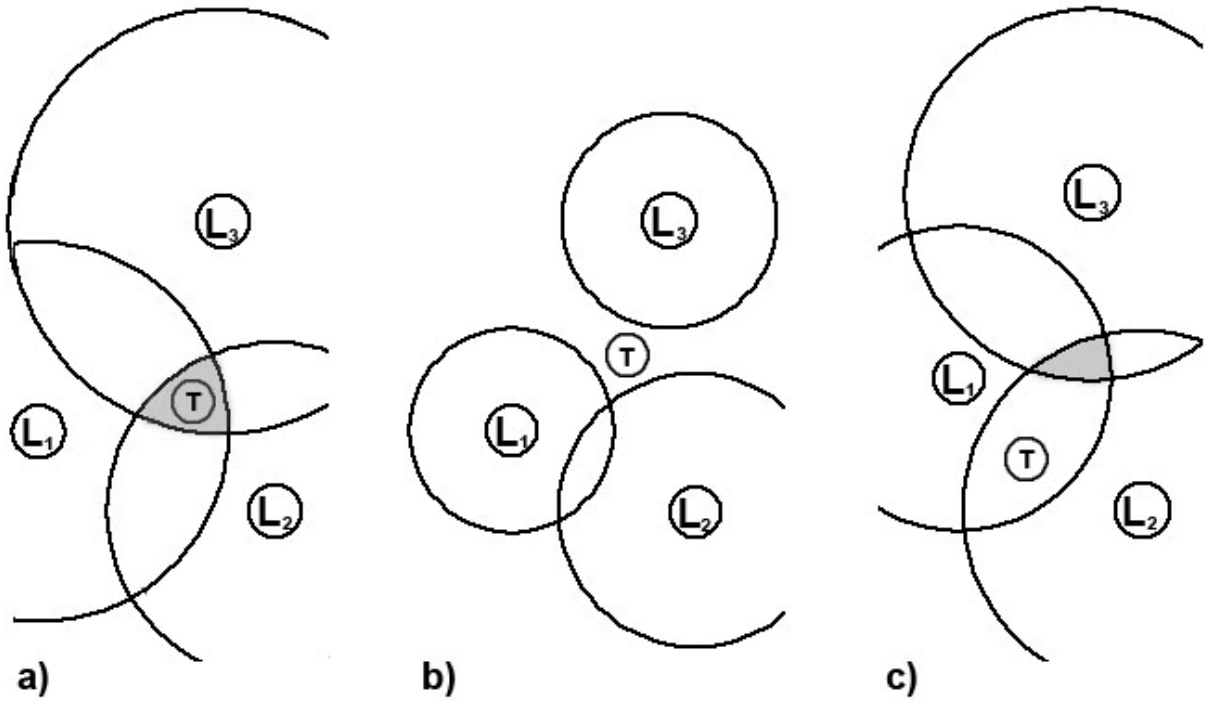
Jedná se o nejběžnější případ, viz obr. 13a). Hranice vzdálenosti referenčních bodů je vzdálenější než dolní hranice a CBG je schopna vytvořit oblast, ve které by se stanice měla nacházet.

Podhodnocení hranic

Tato situace nastane v případě, pokud má cílová stanice lepší vztah mezi vzdáleností a zpožděním vztažený k jednomu z referenčních bodů, než vůči zbytku (čili bestline). Dojde tak k chybě, kdy CBG není schopná vytvořit oblast, ve které by se měla stanice nacházet a prohlásí, že není schopná určit polohu cíle, viz obr. 13b). Tento fakt je důležitou vlastností této metody, protože je lepší polohu neurčit vůbec, než se ji pokusit odhadnout naprosto špatně.

Nadhodnocení i podhodnocení hranic

Toto nastane v případě, kdy některé referenční body nadhodnotí hranice vzdálenosti a současně jiné je podhodnotí. Výsledná pozice stanice tak bude odhadována do oblasti, ve které se stanice vůbec nenachází, viz obr. 13c). K tomuto stavu ale dochází jen výjimečně.



Obr.13: Hranice vzdálenosti: a) nadhodnocení, b) podhodnocení, c) nadhodnocení i podhodnocení

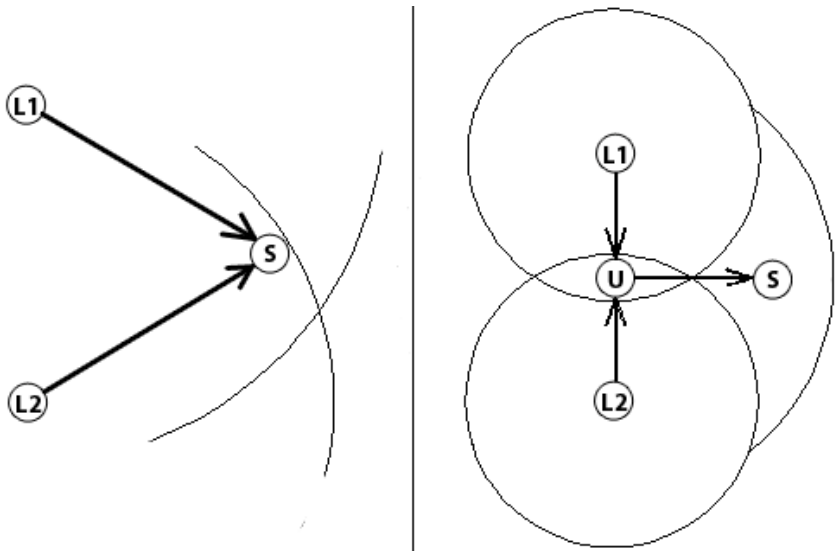
5.6 Speed of Internet (SOI)

Data jsou v optických kabelech přenášena rychlostí dvou třetin rychlosti světla ve vakuu. Technika SOI je založena na pozorování, že geografická vzdálenost mezi stanicemi v internetové síti je mnohem menší než limit šíření rychlosti světla, protože během přenosu paketu dochází k různým zpožděním (viz kap. 3). Tato skutečnost vedla k použití hodnot menších než dvě třetiny rychlosti světla. Z výsledků měření v [20] však zjistili, že skutečná hodnota pro přepočet času na vzdálenost je asi čtyři devítiny rychlosti světla.

SOI je podobná technice CBG. Při určování polohy využívá sadu referenčních bodů, od kterých měří zpoždění pouze k cíli, nikoliv mezi jednotlivými landmarky. Po přepočtu zpoždění se tedy vytyčí hranice kolem landmarků a tam, kde vznikne průnik oblastí, je určena pravděpodobná pozice cílového zařízení [20].

5.7 Topology-Based Geolocation (TBG)

Tato technika při odhadu geografické polohy stanice počítá také s topologii sítě. Je to rozšířená CBG s tím, že při měření zpoždění k cílové stanici přidává informace o topologii a směrování, tzn., že se snaží odhadnout nejen pozici koncové stanice, ale také mezilehlých uzlů (viz obr. 14) [24].



Obr.14: Ukázka techniky TBG.

Na tom obrázku jsou znázorněny dvě situace. V levé části máme dva referenční body (L1 a L2) snažící se o geolokaci stanice S měřením zpoždění s jedním skokem. Pozice stanice je následně odhadnuta jako průnik dvou oblastí kolem landmarků. V pravé části obrázku je

navíc počítáno s jedním uzlem v síti, takže se nepočítá s přímou cestou a odhadovaná pozice je tak o něco blíže referenčním bodům než v předcházejícím příkladě [24].

6 ODHAD POLOHY STANICE V REÁLNÉ SÍTI

Na základě získaných teoretických poznatků a rady vedoucího práce jsem se pokusil odhadnout geografickou pozici stanice v síti Internet pomocí metody Constraint-Based Geolocation (dále jen CBG). Měření proběhlo v rámci referenčních bodů patřící do sítě PlanetLab.

6.1 PlanetLab

PlanetLab je celosvětová výzkumná síť sloužící pro vývoj a testování síťových aplikací a služeb. Je tvořena univerzitami a firmami z IT odvětví. Její uzly jsou rozmístěny po celé planetě, čímž umožňuje testování v reálném prostředí Internetu. Projekt byl spuštěn v roce 2003 a v současné době čítá více než 1100 uzlů. Do sítě mají přístup pouze instituce, které jsou v projektu zapojeny. Každý uživatel má možnost vytvořit si z uzlů vlastní síť a testovat na ní svůj projekt. Česká republika je v síti PlanetLab zastoupena organizací Cesnet a má zde připojeny tři stanice. [25].

6.1.1 Přístup do PlanetLabu

Do uzlů experimentální sítě PlanetLab mají přístup pouze organizace a univerzity, které jsou do projektu zapojeny. Obecně však lze říct, že postup je následující [26]:

- Registrace pro vytvoření účtu v síti PlanetLab v rámci členské organizace nebo univerzity.
- Vytvoření soukromého a veřejného SSH klíče ve formátu OpenSSH. Nahrání veřejného klíče na server PlanetLabu.
- Přiřazení účtu ke konkrétnímu projektu (slice), provádí administrátor daného projektu. Následně se rozšíří vygenerovaný SSH klíč mezi stanice spadající pod tento projekt.

Každý registrovaný uživatel si pak může do projektu přidávat libovolné uzly a testovat na nich své práce. Název slice, pod který uživatel spadá, se používá jako přihlašovací jméno na vzdálených stanicích. Moje práce byla prováděna v rámci projektu cesnet_vutbr2, který spadá pod sdružení Cesnet.

6.2 Dataset

Moje práce je založena na datasetu, který je tvořen dvaceti osmi referenčními body. Ty se nachází ve čtrnácti evropských zemích (viz obr. 15). Evropu jsem vybral záměrně, protože síťová infrastruktura v těchto zemích je na vysoké úrovni, disponuje dostatkem vysokorychlostních linek s dobrou šířkou pásma, což by mělo minimalizovat nežádoucí zpoždění a zvýšit přesnost zvolené metody. Použité landmarky spadají pod univerzity ve velkých městech, kde jsem takovéto spojení předpokládal.

Obr.15: Zvolený dataset pro metodu CBG.

Dalším kritériem při výběru referenčních bodů byla jejich geografická poloha. Snažil jsem se je zvolit tak, aby od sebe byly dostatečně vzdáleny a netvořili shluky. Jejich poloha musela být také důvěryhodně zjistitelná. Databáze PlanetLabu obsahuje mimo jiné také geografické souřadnice sídla instituce (site), pod kterou stanice spadá. Pokud má ovšem tato instituce několik takovýchto stanic, může se stát, že všechny nemusí odpovídat poloze dané site. Proto jsem se s vedoucím práce dohodl, že za jakýsi etalon při ověřování polohy bude

sloužit aplikace na stránkách ip2location.com, která by měla disponovat dostatečnou přesností.

Protože metoda CBG vyžaduje použití aktivních referenčních bodů, musely samozřejmě tuto podmínku splňovat i mnou zvolené stanice. Měly tak přístup ven ze své sítě do Internetu, byly schopny odesílat zprávu „Echo Request“ protokolu ICMP a odpovídat na ni.

Jak jsem uvedl výše, můj dataset obsahuje dvacet osm referenčních bodů. V rámci použité metody platí - čím více, tím lépe, původně jsem jich tak měl připravených čtyřicet, avšak něž jsem stihl všechny odměřit z nezjištěných příčin jsem k některým ztratil přístup a musel je tak ze skupiny vyřadit.

Jako cíl jsem zvolil soubor pěti stanic se známou polohou z důvodu porovnání přesnosti odhadu. Stanice se nacházely v následujících městech: Erlangen (Německo), Liege (Belgie), Reggio Emilia (Itálie), Ljubljana (Slovinsko), Brno (Česká republika).

6.3 Měření zpoždění

Cílem měření bylo co nejpřesněji zjistit hodnotu RTT mezi jednotlivými referenčními body a také mezi nimi a cílovými stanicemi. Polohy zjišťovaných stanic byly předem známé a to z důvodu ověření přesnosti při následném určení pozic. Po připojení ke vzdálené stanici (referenčnímu bodu) prostřednictvím aplikace Putty, jsem na ní spustil program Ping a začal měřit hodnoty obousměrného zpoždění. Měření probíhalo v různých pracovních dnech, většinou v odpoledních hodinách. Měření byla provedena několikrát (v průměru asi 1500x od každého landmarku) z důvodu zjištění minimálního zpoždění. Minimální zpoždění bylo použito kvůli eliminaci zpoždění vznikajících zatížením přenosových prvků. Tato chyba však pravděpodobně nebyla eliminována úplně.

6.3.1 Kalibrace

Po změření latence mezi referenčními body bylo nutné určit jak daleko jsou od sebe stanice vzdáleny. K tomu jsem využil nástroj „Měření“ na webu mapy.cz. Tento způsob pravděpodobně není nejpřesnější, ale v rámci mého experimentu by měl být dostačující. Následovalo určení „bestline“ pro jednotlivé landmarky. K tomu jsem využil program GraphSight [27]. Pomocí nich a zpoždění změřenému vůči hledané stanici jsem určil hranice vzdálenosti a pokusil se odhadnout polohu cíle.

Následující tabulka obsahuje výsledky mého měření pro stanici v Erlangenu, hranice vzdálenosti a odhad polohy cílové stanice je na obr. 16.

Poloha referenčního bodu	**RTT vůči cíli [ms]**	**Skutečná vzdálenost vůči cíli [km]**	**Hranice vzdálenosti [km]**	**Chyba odhadu [km]**
ZURICH	16,404	307	742	435
LAUSANNE	13,106	473	675	202
SAARBRUCKEN	10,942	295	385	90
ILMENAU	2,762	122	187	65
ESSEN	14,209	352	637	285
BREMEN	11,138	417	496	79
AACHEN	8,835	376	433	57
PASSAU	6,339	214	317	103
MADRID	35,231	1558	2030	472
PRAGUE	12,161	254	640	386
ATHENS	52,868	1650	2120	470
IOANNINA	59,36	1351	1830	479
DUBLIN	30,469	1280	1500	220
AMSTERDAM	11,828	530	637	107
WROCLAW	21,651	462	706	244
STOCKHOLM	28,283	1175	1490	315
LONDON	21,042	822	1125	303
DUNDEE	31,608	1215	1595	380
VIENNA	18,739	425	853	428
INNSBRUCK	29,365	263	1170	907
BUDAPEST	20,238	645	1086	441
CATANIA	47,115	1383	2145	762
ROME	30,589	865	1383	518
NICE	33,372	718	1610	892
RENNES	27,54	952	1216	264
NANCY	25,937	367	1466	1099
TROYES	42,107	530	1166	636
PARIS	30,391	640	1116	476

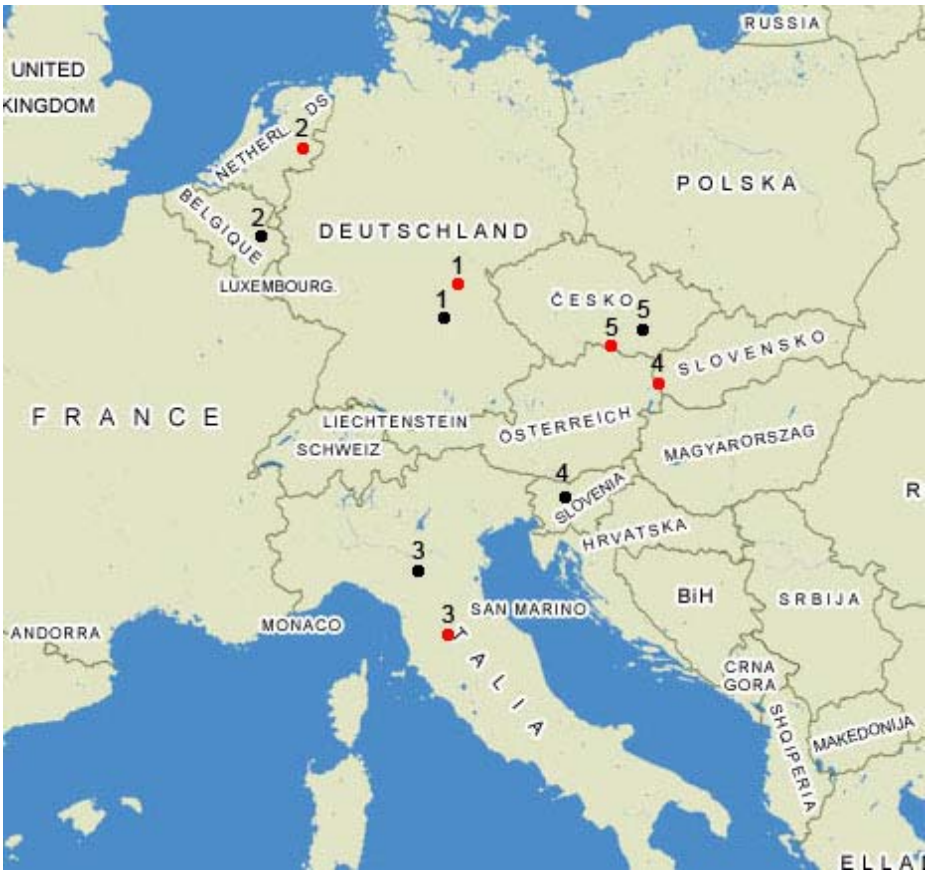
Tab.3: Výsledky měření pro Erlangen.

Obr.16: Hranice vzdálenosti a odhad polohy cíle Erlangen.

Analogicky jsem postupoval i v případě zbylých čtyř stanic. Jejich chybně odhadnuté vzdálenosti vůči původní poloze jsou v tabulce 4. Obr. 17 následně zobrazuje skutečnou polohu (černá barva) a odhadnutou polohu (červená barva) cílových stanic.

Poloha cíle	Chyba odhadu [km]
ERLANGEN	100
LIEGE	200
REGGIO EMILIA	150
LJUBLJANA	380
BRNO	55

Tab.4: Chyby při odhadu poloh stanic.



Obr.17: Skutečná (černá) a odhadnutá (červená) poloha stanic.

6.4 Zhodnocení výsledků

Obecně by se dalo říci, že se zvyšující se vzdáleností referenčního bodu od hledané stanice by se chyba odhadu měla zvyšovat. Z hodnot tabulky 3 to však nevyplývá. Naopak je vidět, že nejvíce záleží na tom, po jaké trase jsou data směrována. Vezme například uzly ve Vídni a Innsbrucku. Vídeňský uzel je od skutečné polohy cílové stanice vzdálen asi 425 km a hodnota změřeného zpoždění je 18,739 ms. Naopak innsbrucký uzel, přestože se nachází o 162 km blíže, má hodnotu zpoždění 29,365 ms. Z toho jasně vyplývá, že data byla směrována mnohem delší cestou, než v prvním případě. Tím pádem neúměrně narostla také hranice vzdálenosti od referenčního bodu v Innsbrucku a místo toho, aby se zvýšila přesnost výsledného odhadu pozice cíle, nastal pravý opak. Totéž nastalo v případě uzlu města Nancy. Tam je hranice vzdálenosti dokonce čtyřikrát dál, než je skutečná poloha hledané stanice. Po pokusu o zjištění, kterou cestou byla data směrována jsem zjistil, že data byla odeslána přes Anglii. Vycházel jsem při tom z porovnání IP adresy, kterou poskytl program Traceroute, s databází na serveru ip2location.com (viz obr. 18).

```
traceroute to 131.188.44.100 (131.188.44.100), 30 hops max, 60 byte packets
 1  new-gw.loria.fr (152.81.30.18)  0.872 ms  0.888 ms  0.897 ms
 2  gw1.nancy.gw.lothaire.net (193.50.80.13)  1.185 ms  1.194 ms  1.143 ms
 3  vl50-te1-3-nancy-rtr-021.noc.renater.fr (193.51.181.110)  1.097 ms  1.089 ms
  1.044 ms
 4  te0-0-0-2-paris1-rtr-001.noc.renater.fr (193.51.189.161)  6.240 ms  6.297 ms
  6.296 ms
 5  renater.rt1.par.fr.geant2.net (62.40.124.69)  5.828 ms  5.833 ms  5.940 ms
 6  as1.rt1.gen.ch.geant2.net (62.40.112.23)  14.529 ms  14.527 ms  14.717 ms
 7  so-4-0-0.rt1.fra.de.geant2.net (62.40.112.161)  99.399 ms  99.420 ms  99.366
 ms
 8  dfn-gw.rt1.fra.de.geant2.net (62.40.124.34)  23.415 ms  23.415 ms  23.549 ms
 9  zr-erl1-te0-0-0-4.x-win.dfn.de (188.1.145.197)  27.892 ms  27.198 ms  27.134
 ms
10  xr-erl1-te2-1.x-win.dfn.de (188.1.145.166)  26.865 ms  27.049 ms  27.052 ms
11  kr-uni-erlangen1.x-win.dfn.de (188.1.234.230)  27.728 ms  27.672 ms  27.410
ms
12  constellation.gate.uni-erlangen.de (131.188.20.105)  27.398 ms  27.277 ms  2
7.006 ms
13  informatik.gate.uni-erlangen.de (131.188.20.38)  27.185 ms  26.957 ms  27.26
7 ms
14  planetlab1.informatik.uni-erlangen.de (131.188.44.100)  26.849 ms  27.116 ms
  27.057 ms
```

Obr.18: Výpis programu traceroute pro uzel ve městě Nancy.

Jak je vidět na obr. 16, tak po určení hranic vzdáleností a jejich následném zobrazení na mapě, vznikla v jejich průniku oblast, kde by se cílová stanice měla nacházet. Odhadovaná poloha cíle by měla být uprostřed tohoto regionu. Skutečnou hledanou stanicí byl universitní server ve městě Erlangen v Německu. Můj odhad však vyšel asi o 100 km dál na sever. Co se týká stanic v Liege a Ljubljaně, tak tam byl odhad poněkud nepřesný. Nepodařilo se mi ani správně určit zemi, ve které se skutečně nachází. Jednou z příčin toho špatného odhadu je například to, že dané země jsou svou rozlohou malé a tak jakákoliv větší chyba při odhadu určí pozici stanice v sousedním státě. Navíc v případě Liege byla všechna data od nejbližších referenčních bodů směrován přes Anglii, což značně navýšilo hodnoty zpoždění a nepřispělo ke zlepšení odhadu. Naopak nejlépe dopadl odhad brněnského uzlu, jehož chyba byla 55 km. Výrazně k tomu přispěly referenční uzly v Praze a Vídní, od kterých byla data směrována nejkratší cestou.

V porovnání s experimenty prováděné v [22] je průměrná chyba mého odhadu vyšší (175 km). Autoři tam dospěli k výsledku s chybou 100 km pro americký dataset, resp. 25 km pro evropský.

Hlavní příčinu vidím v relativně nízkém počtu použitých referenčních bodů. Ve výše uvedené práci bylo použito 95 uzlů v Americe (42 v Evropě), zatímco můj dataset měl velikost 28 landmarků. V případě metody CBG totiž platí - čím více referenčních bodů, tím

lépe. Proto věřím, že bych se při použití alespoň dvojnásobného počtu uzlů mohl dostat na podobné hodnoty odhadu jako ve zmiňované práci.

Dalším důvodem je také to, že autoři v [22] měli měření zautomatizované. Jejich program byl schopen odhalovat a vyřazovat referenční body, které vnášely do výsledku nějakou chybu (např. podhodnocování hranic), upravovat „bestline“ na základě zatížení sítě apod., zatímco já jsem zjišťoval hodnoty z grafů a map. K lepšímu výsledku by jistě také přispěl větší počet opakování měření zpoždění, než který jsem použil já, což by mohlo ještě více potlačilo vliv nežádoucího zkreslení.

V porovnání s výsledky jiných metod uvedených v pracích [1], [20] a [22], kde byla chyba odhadu 36 km pro CBG, 145 km pro GeoLim, 110 km pro GeoPing, nebo 334 km u metody SOI, jsem dosáhl relativně dobrého výsledku.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá tématem geolokace v síti Internet, čili určování fyzické pozice stanice v této síti. Geolokace se v dnešní době uplatňuje ve stále větším měřítku. Můžeme se s ní setkat především v online aplikacích, například v podobě cílené reklamy (zobrazení reklamního banneru v rodném jazyce), při vyhledávání stránek (upravené výsledky hledání v závislosti na poloze uživatele) nebo jízdních řádů (předvyplněný formulář odjezdové stanice) apod. V práci jsou rozebrány různé způsoby geolokace rozdělené do dvou kategorií - na aktivní a pasivní metody.

Pasivní geolokační techniky jsou ty, které ke své činnosti nepotřebují žádná aktivní měření v síti, pouze porovnávají dostupné geolokační údaje (většinou IP adresu) s nějakou databází. Databáze může být jak soukromá, tak veřejná. Tyto techniky se hodí právě pro online aplikace, nebylo by totiž rozumné zatěžovat síť nadměrným provozem v podobě měření zpoždění od několika landmarků ke každému uživateli. Přesnost těchto technik závisí na kvalitě databáze se kterou údaje porovnávají. V případě kvalitních databází jsme schopni určit pozici stanice v řádech stovek metrů, v opačném případě se údaje v databázi vůči hledané stanici nemusí vyskytovat a nejsme tak schopni určit polohu vůbec.

Aktivní geolokační techniky ke své činnosti vyžadují měření v síti. Jedná se hlavně o zjišťování zpoždění od referenčního bodu v síti, jehož polohu předem známe (tzv. landmarku), vůči hledanému zařízení (nejčastěji počítači). Následným přepočtem toho zpoždění na vzdálenost získáme pravděpodobnou polohu cílové stanice.

Hodnota zpoždění vznikající mezi zdrojovou a cílovou stanicí je závislá na několika dílčích faktorech, jakými jsou například přenosová rychlost linek nebo jejich aktuální zatížení. Při geolokaci však hraje hlavní roli délka přenosové cesty, na níž je výrazné zpoždění rychlostí šíření dat, které není nižší než 5μs na 1 km. Druhým nejvýraznějším faktorem je počet mezilehlých uzlů na trase. Doba zpoždění se v takovém zařízení může pohybovat od desítek až po stovky mikrosekund.

Pro měření parametrů sítě dnes existuje mnoho programů i hardwarových zařízení, mezi ty nejpoužívanější a nejjednodušší patří program Ping, který je součástí snad všech operačních systémů. Pro zjištění počtu uzlů na trase slouží program Traceroute.

V praktické části práce jsem se pokusil odhadnout pozice souboru pěti stanic na základě předchozích teoretických poznatků. Využita byla metoda CBG. Od referenčních bodů z experimentální sítě PlanetLab jsem změřil několik hodnot zpoždění vůči hledaný stanicím i samotným landmarkům. K následné kalibraci (resp. určení „bestline“) a určení hranic

vzdáleností byla použita nejmenší naměřená hodnota a to z důvodu eliminace zpoždění vznikajícím zatížením přenosových prvků. Z výsledků měření je patrné, že pro určení co nejpřesnější hranice vzdálenosti ani tak nezáleží na vzdálenosti referenčního bodu od cíle, ale na cestě, kterou jsou data směrována. Je to dáno z toho důvodu, že přenosové cesty nejsou vedeny přímo. Konečné chybně odhadnuté vzdálenosti od skutečných poloh stanice vyšly asi 100 km pro Erlangen, 200 km pro Liege, 150 km pro Reggio Emiliu, 380 km pro Ljubljanu a 55 km pro Brno. V porovnání s výsledky měření uvedených v [1], [20] a [22], u metod jako TBG (209 km), SOI (334 km) nebo CBG (36 km), se jedná o docela slušný výsledek, který by bylo možné ještě zpřesnit například použitím většího počtu referenčních bodů.

LITERATURA A ZDROJE

[1] Bernard, W.; et al. *Geolocalization on the Internet through Constraint Satisfaction* [online]. 2010 [cit. 2010-11-09]. Cornell University, Dept. of Computer Science. Dostupné z WWW: <www.cs.cornell.edu/People/egs/papers/octant-worlds.pdf>.

[2] *Subreg.cz - Domény celého světa* [online]. 2010 [cit. 2010-11-19]. Doménový slovník. Dostupné z WWW: <http://info.subreg.cz/domenovy-slovnik.html>.

[3] *CSIRT.CZ* [online]. 2008 [cit. 2010-11-22]. Co je database RIPE? K čemu slouží?. Dostupné z WWW: <https://www.csirt.cz/%C4%8Cast%C3%A9%20dotazy#CojedatabaseRIPE.3FK.2BAQ0-emuslou.2BAX4A7Q.3F>.

[4] *WindowsNetworking.com* [online]. 2005 [cit. 2010-11-24]. Using NSLOOKUP for DNS Server diagnosis. Dostupné z WWW: <http://www.windowsnetworking.com/articles_tutorials/Using-NSLOOKUP-DNS-Server-diagnosis.html>.

[5] HASSMAN, Martin. *HTML 4 5 6...* [online]. 2010 [cit. 2010-11-25]. Jak funguje geolokace ve Firefoxu. Dostupné z WWW: <http://html456.blogspot.com/2010/06/jak-funguje-geolokace-ve-firefoxu.html>.

[6] BOVY, C.J., et al. *Analysis of End-to-end Delay Measurement in Internet*. *Passive & Active Measurement* [online]. 2002, č. 8, [cit. 2010-12-03]. Dostupný z WWW: <http://www.ripe.net/ripe/meetings/ripe-41/presentations/0201_RIPE41_TUD/>.

[7] MOLNÁR, Karol. *Teorie front* [online]. 2009 [cit. 2010-12-04]. Dostupné z WWW: <http://www.utko.feec.vutbr.cz/~molnar/mmos/fronty_bez_korekce.docx>.

[8] HÁGA, Péter. *A Model Based Approach for Improving Geolocation* [online]. Hungary : Eötvös Loránd University, 2010. 36 s. Prezentace. Eotvos Lorand University. Dostupné z WWW: <www.caida.org/workshops/isma/1002/slides/aims1002_phaga.ppt>.

[9] LAKI, S., et al. A model based approach for improving router geolocation. *Computer Networks* [online]. 2010, č. 54, [cit. 2010-12-05]. Dostupný z WWW: <www.elsevier.com/locate/comnet>.

[10] DOSTÁL, Radim. *Root.cz* [online]. 14.7.2003 [cit. 2011-04-16]. Sokety a C/C++: ICMP protokol. Dostupné z WWW: <http://www.root.cz/clanky/sokety-a-c-icmp-protokol/>.

[11] *Microsoft TechNet* [online]. 2011 [cit. 2011-04-16]. Protokol ICMP (Internet Control Message Protocol). Dostupné z WWW: <http://207.46.16.252/cs-cz/library/cc758065(WS.10).aspx>.

[12] JAROŠOVÁ, Lucie. *Měření vzdálenosti stanic prostřednictvím ICMP protokolu v IP sítích.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací 2008, 63s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radim Burget

[13] *Ping Me* [online]. 2010 [cit. 2010-12-05]. IP Address Ping Tool. Dostupné z WWW: <http://pingme.cc/pinger.php>.

[14] PATERA, Jiří. *Jiří Patera* [online]. 2009 [cit. 2010-12-05]. Ping pro Linux. Dostupné z WWW: <http://jiri.patera.name/!old-data/ppi/ping-linux.html>.

[15] ODVÁRKA, Petr. *Svět Sítí* [online]. 2001 [cit. 2010-12-05]. ICMP - Internet Control Message Protocol. Dostupné z WWW: <http://www.svetsiti.cz/view.asp?rubrika=Technologie&clanekID=36>.

[16] *Ping Me* [online]. 2010 [cit. 2010-12-05]. Traceroute Tool. Dostupné z WWW: <http://pingme.cc/trace.php>.

[17] *Exit109.com* [online]. 2002 [cit. 2010-12-05]. Using Traceroute. Dostupné z WWW: <http://www.exit109.com/~jeremy/news/providers/traceroute.html>.

[18] PADMANABHAN, Venkata N.; SUBRAMANIAN, Lakshminarayanan *An Investigation of Geographic Mapping Techniques for Internet Hosts.* In Internet Measurement Conference. 2001. [s.l.]: ACM/SIGCOMM, 2001. s. 13. Dostupné z WWW: <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2001/p14-padmanabhan.pdf>. ISBN 1-58113-411-8.

[19] DOLEŽEL, Pavel. *Současné možnosti nalezení fyzické pozice stanice v Internetu*. Brno, 2010. 50 s. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

[20] Katz-Bassett, E.; et al. *Towards IP Geolocation Using Delay and Topology Measurements* [online]. 2006 [cit. 2010-12-06]. University of Washington, Seattle. Dostupné z WWW: < www.cs.washington.edu/homes/arvind/papers/geoloc.pdf>.

[21] Chatzopoulou, D.; Kokkodis, M. *IP Geolocation* [online]. 2006 [cit. 2010-12-06]. Computer Science and Engineering Dept, UC Riverside. Dostupné z WWW: <https://www.cs.ucr.edu/~mak/grad/geolocation.pdf>.

[22] GUEYE, Bamba; et al. *Constraint-Based Geolocation of Internet Hosts.* In Internet Measurement Konference. 2004. [s.l.]: ACM/SIGCOMM, 2004. s. 14. Dostupné z WWW: <http://www.cs.bu.edu/fac/crovella/paper-archive/imc04-geolocation-full.pdf>. E00-108534666

[23] Youn, Inja. Stochastic methods for geolocation of Internet hosts [online]. 2003 [cit. 2011-12-05]. Georgie Mason University. Dostupné z WWW: < http://cs.gmu.edu/~iyoun/geo/paper/IY-Proposal-081118.pdf>.

[24] Baden, R. *IP Geolocation in Metropolitan Area Network* [online]. 2007 [cit. 2010-12-08]. University of Maryland, College Park. Dostupné z WWW: <www.cs.umd.edu/Grad/scholarlypapers/papers/RandolphBaden.pdf>.

[25] *PlanetLab* [online]. 2007 [cit. 2010-12-10]. PlanetLab. Dostupné z WWW: <http://www.planet-lab.org/>.

[26] *PlanetLab* [online]. 2007 [cit. 2011-05-13]. User's Guide. Dostupné z WWW: <https://www.planet-lab.org/doc/guides/user>.

[27] *Cradle Fields* [online]. 2004 [cit. 2011-05-18]. GraphSight. Dostupné z WWW: <http://www.cradlefields.com/gs/graphsight.html>.