

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Diplomová práce



Bc. Lukáš Lendvorský

**Použití metody sledování paprsku pro modelování
šíření vln na rádiových a optických kmitočtech**

Katedra počítačové grafiky a interakce

Vedoucí: prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra počítačové grafiky a interakce

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Lukáš Lendvorský**

Studijní program: Otevřená informatika
Obor: Počítačová grafika a interakce

Název tématu: **Použití metody sledování paprsku pro modelování šíření vln na rádiových a optických kmitočtech**

Pokyny pro vypracování:

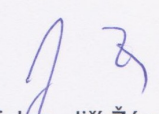
Vypracujte srovnávací studii použití metod sledování paprsku v počítačové grafice a radiotechnice. S využitím algoritmů používaných v počítačové grafice dále vytvořte demonstrační softwarový nástroj pro 3D simulaci šíření rádiových vln ve složitém prostředí reálného terénu. Jako model terénu použijte volně dostupné globální výškopisné mapy. Bezdrátový spoj bude ve 3D zobrazení reprezentován dvěma anténami, každá pak svou polohou, nasměrováním a šířkou svazku směrové charakteristiky. Uvažujte pouze šíření vlny na přímou viditelnost a odrazy, vliv difrakce zanedbejte. Zvolte vhodný způsob pro vizualizaci vícecestného šíření a rozhodujících oblastí na scéně z hlediska odrazů. Pro případ pohybující se přijímací antény zobrazte impulzovou odezvu a relativní výkonovou úroveň pro různé způsoby sčítání jednotlivých paprsků. Funkčnost softwaru ověřte a demonstруйте na alespoň třech scénářích.

Seznam odborné literatury:

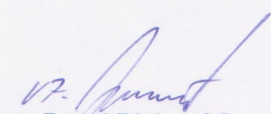
- [1] Žára, J. - Beneš, B. - Felkel, P.: Moderní počítačová grafika. Computer Press, 1998.
- [2] Pechač, P. - Zvánovec, S.: Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů. Praha: BEN - technická literatura, 2007.
- [3] <http://eros.usgs.gov/elevation-products>

Vedoucí: prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2016/2017


prof. Ing. Jiří Žára, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 6. 10. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne.....

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval prof. Ing. Pavlu Pechačovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a zejména trpělivé vysvětlování problematiky z oboru radiotechniky.

Abstrakt

Tato práce srovnává rozdíly mezi raytracingem v počítačové grafice a raytracingem pro simulaci šíření rádiových vln. Srovnání je jak z hlediska rozdílnosti fyzikálních jevů obou typů raytracingu, tak rozdíly v jejich implementaci a náročnosti. Součástí práce je zároveň aplikace simulující šíření vlny v nerovném terénu.

Abstract

This thesis compares differences between raytracing in computer graphics with raytracing used to simulate propagation of radio waves. The comparison includes differences of physical phenomena and implementation of raytracing. A part of this thesis is also an application that simulates propagation of radio waves in uneven terrain.

Obsah

1	Úvod	1
2	Elektromagnetické vlnění	2
2.1	Rádiová vlna	3
2.1.1	Antény	3
2.1.2	Spoje	5
2.2	Světlo	6
3	Počítačová grafika a raytracing	8
4	Rádiové vlnění a raytracing	11
5	Srovnání jevů a veličin	15
5.1	Veličiny pro světlo	15
5.2	Veličiny pro rádiové vlny	17
5.3	Odraz	19
5.3.1	Odraz světla	19
5.3.2	Odraz rádiové vlny	20
5.4	Lom (refrakce) a průchod materiály	21
5.5	Difrakce	23
5.6	Interference	25
5.7	Polarizace	27
6	Srovnání raytracingu	30
6.1	Terminologie	30
6.2	Srovnání	31
6.3	Srovnání výpočetní složitosti	33

7	Demonstrační aplikace	36
7.1	Řešení	37
7.1.1	Raytracing	37
7.2	Vizualizace	41
7.3	Grafy	43
8	Závěr	47
	Přílohy	49
	Příloha A Obsah přiloženého CD	49
	Příloha B Výsledky	50
B.1	Jednoduchá scéna	50
B.2	Reálný terén - okolí města Kadaň	51
B.3	Scéna s výraznými nerovnostmi	52

Seznam obrázků

1	Spektrum elektromagnetického záření	2
2	Frekvenční závislost a šířka pásma rezonanční antény	5
3	Směrová charakteristika směrové antény	6
4	Vnímaná barva dle vlnové délky	6
5	2,5D metoda raytracingu	13
6	Plocha rozhodná pro odraz	21
7	Difrakce vlnění na překážce	23
8	Difrakce na bodové štěrbině (Fresnelovy kroužky)	23
9	Difrakce světla z na překážce	24
10	Difrakce u rádiového spoje a poměrná intenzita signálu v závislosti na velikosti překážky	25
11	Difrakce na malé štěrbině	26
12	Vícecestné šíření signálu	27
13	Standardní algoritmus průsečíku (nahore), upravený algoritmus průsečíku (dole)	39
14	Buňky traverzované DDA algoritmem	40
15	Nepřesnost hledání pozice průsečíku	41
16	Interpolované normály	42
17	Příklad vizualizované scény	43
18	Testovací scéna s impulsní odezvou a poměrnou intenzitou	46

Seznam tabulek

1	Rozdělení rádiové vlny dle frekvence	4
2	Fotometrické veličiny	16
3	Obsah CD	49

1 Úvod

Raytracing je počítačová disciplína, pro kohokoliv zabývajícího se o počítačovou grafikou, známá jako prostředek pro simulaci šíření světla, potažmo vykreslení scény. Jelikož světlo je druh elektromagnetického vlnění, stejně jako rádiová vlna, lze raytracing za určitých podmínek použít i pro simulaci šíření rádiové vlny. Pak se hovoří o optických metodách simulace šíření rádiových vln. Rozdíl mezi těmito vlněními je zejména ve vlnové délce, od toho se odvíjí mnoho dalších fyzikálních vlastností a chování při šíření. Tato práce se pokusí srovnat obě vlnění z různých hledisek. Jednak srovnání samotných fyzikálních vlastností obou vlnění a jevů zajímavých pro šíření, ale i samotné algoritmy raytracingu.

Pod metodou raytracingu světla se v této práci rozumí zejména sledování paprsků pro vykreslení scény nebo výpočet osvětlení ve scéně, nikoliv jeho speciální varianty, například pro vědecké simulace a podobně. V současné době díky pokrokům hardwaru je možné provádět raytracing i v reálném čase, a tak by mohl v budoucnu nahradit rasterizaci. Raytracing, na rozdíl od rasterizace, simuluje světlo, podobně jako se šíří ve skutečném prostředí a díky tomu může dosáhnout věrnějšího zobrazení scény.

Raytracingem rádiových vln je myšleno jeho využití pro simulaci šíření signálu, pro účely návrhu rádiového systému. Simulace šíření signálu se používá například pro minimalizaci interferenci mezi různými systémy nebo buňkami, může pomoci s výběrem vhodných antén, jejich umístěním, ale i celkově optimalizovat kvalitu daného spoje a potažmo dané služby. V dnešních bezdrátových systémech 4. generace je simulace již nutnou součástí návrhu. Kromě toho může simulace signálu výrazně snížit cenu systému, protože pomůže vybrat správné technologie, ještě ve fázi návrhu a nebude třeba provádět tolik nákladných a komplikovaných měření.

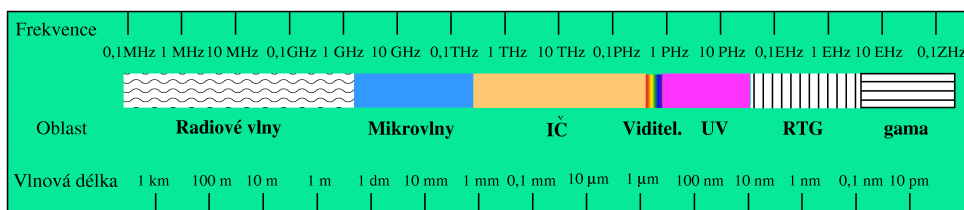
První částí této práce je rešerše, kde jsou vysvětleny některé základní pojmy, vysvětlena motivace a účel simulace. V další části budou porovnány jednotlivé jevy zajímavé pro šíření a jejich rozdíly. Jevy jsou zároveň porovnány z hlediska simulace raytracingem. Protože raytracing je pouze jakási aproximační simulace, každý z těchto algoritmů musí uvažovat se zjednodušením skutečných jevů. Tato zjednodušení jsou také porovnána. Dále bude uvedeno srovnání složitosti obou raytracingů. Součástí této práce je rovněž demonstrační aplikace pro simulaci šíření rádiových vln. Ta je implementována technikami, jako se používají v grafice. Jejím cílem je jednak vyzkoušet, zda se na vlnění hodí stejné techniky jako pro grafiku a zároveň vytvořit demonstrační nástroj pro výuku, na kterém půjdou demonstrovat některé jevy šíření signálu v terénu.

2 Elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické vlnění představuje děj vzájemných přeměn elektrické a magnetické složky pole [1]. Obě složky, elektrická, kterou představuje vektor intenzity elektrického pole \vec{E} , a magnetická, kterou tvoří vektor magnetické indukce \vec{B} jsou na sebe kolmé, jsou neoddělitelně spjaty a vytvářejí jediné elektromagnetické pole.

Elektromagnetické vlnění lze dle frekvence rozdělit na několik typů:

- rádiové vlny
- terahertzové záření
- infračervené záření
- viditelné světlo
- ultrafialové záření
- rentgenové záření
- gama záření



Obrázek 1: Spektrum elektromagnetického záření, Zdroj: Wikipedia

Z toho plyne, že jak světlo tak i rádiové vlny jsou elektromagnetické vlnění, takže pro ně platí stejné fyzikální zákony. Kvůli rozdílným vlnovým délkám se liší způsoby výpočtů a případná zjednodušení, která je možné uvažovat. To bude dále zkoumáno v dalších kapitolách. Tato práce se dále bude zabývat pouze viditelným světlem a rádiovými vlnami, proto pokud dále v textu budou formulace jako oba typy vlnění, oba obory atd., je tím myšleno světlo a rádiové vlny.

2.1 Rádiová vlna

Rádiový signál je elektromagnetická vlna s vlnovou délkou řádově od milimetrů do kilometrů. Elektromagnetické vlnění vyzařuje jakýkoliv elektrický náboj pohybující se s nenulovým zrychlením, to znamená zejména střídavý elektrický proud. Elektromagnetické vlnění lze zároveň indukci přeměnit na napětí a proud. Frekvence vlnění a proudu si je v těchto případech vždy rovna. Z této vlastnosti plyne, že pokud vysílací anténou prochází střídavý proud, bude tento proud přeměněn na elektromagnetické vlnění, které se samovolně šíří prostorem a to může být následně přeměněno v přijímací anténě zpět na napětí a proud. Přenašečem energie je samotné elektromagnetické vlnění, napětí a proud je pouze jeho projev. Vlnění se ve vakuu šíří rychlostí světla, v ostatních prostředích pomaleji, v závislosti na konkrétním materiálu.

Rádiové vlny se dále dělí na několik podkategorií, dle frekvence, viz tabulka 1. Kromě těchto základních kategorií jsou frekvence dále alokovány pro různá použití. Například velmi vysoké frekvence využívá rozhlas a televizní vysílání. Ultra vysoké frekvence používá zejména GSM síť a WiFi, ale i spousta dalších služeb zejména v pásmu 2,4 GHz. Příslušné přiřazení frekvence ke službě není volné, ale podléhá přísným pravidlům vydávaným Českým telekomunikačním úřadem.

Vlnová délka harmonického elektromagnetického vlnění je vzdálenost, kterou vlnění urazí za jednu periodu, platí tedy:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad (1)$$

kde $c[\text{ms}^{-1}]$ je rychlost šíření vlnění, $T[\text{s}]$ je perioda, $f[\text{Hz}]$ je frekvence. Rychlost šíření je rovna rychlosti světla, ta se ale liší dle prostředí, skrz které vlnění prochází. Pro vakuum je to 299792458m/s . Pro ostatní prostředí je rychlost šíření nižší (v závislosti na permeabilitě a permitivitě), např. pro vodu je to cca $1/9$ rychlosti ve vakuu. Stejným poměrem jako rychlost se mění i vlnová délka vlnění a proto například dipól musí být 9x kratší ve vodě oproti vakuu.

2.1.1 Antény

Anténa je nedílnou součástí každého rádiového systému. Anténa je v radiovém systému prvek, ve kterém vlna vedená jako elektrický proud vytvoří elektromagnetickou vlnu nebo

2.1 Rádiová vlna

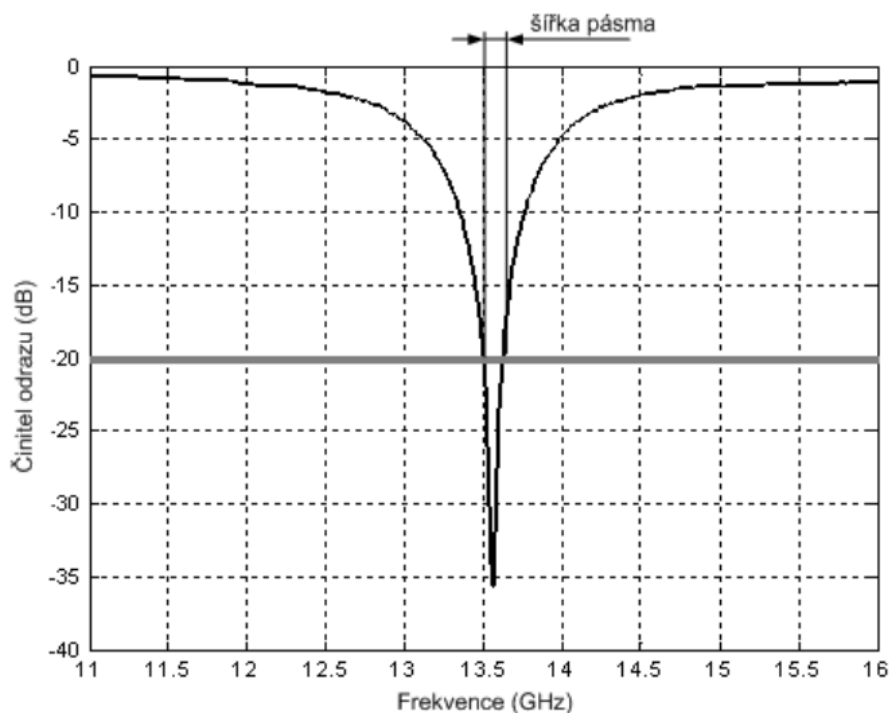
Číslo pásma	Mezinárodní zkratka	Frekvence/ Vlnová délka	Český ekvivalent	Metrické označení
3	ULF	300 Hz – 3 kHz 1000 km-100 km	EDV, extrémně dlouhé vlny	hkm, hektokilmetrické vlny,
4	VLF	3 kHz – 30 kHz 100 km-10 km	VDV, velmi dlouhé vlny	Mam, myriamerové vlny
5	LF	30 kHz – 300 kHz 10 km-1 km	DV, dlouhé vlny	km, kilometrové vlny
6	MF	300 kHz – 3 MHz 1 km-100 m	SV, střední vlny	Hm, hektometrové vlny
7	HF	3 MHz – 30 MHz 100 m-10 m	KV, krátké vlny	Dm, dekametrové vlny
8	VHF	30 MHz – 300 MHz 10 m-1 m	VKV, velmi krátké vlny	m, metrové vlny
9	UHF	300 MHz – 3 GHz 1 m-10 cm	UKV, ultra krátké vlny	dm, decimetrové vlny
10	SHF	3 GHz – 30 GHz 10 cm-1 cm	SKV, super krátké vlny	cm, centimetrové vlny
11	EHF	30 GHz- 300 GHz 1 cm-1 mm	EKV, extrémně krátké vlny	mm, milimetrové vlny

Tabulka 1: Rozdělení rádiové vlny dle frekvence, Zdroj: [1]

opačně. Podle toho rozlišujeme anténu vysílací nebo přijímací. Pro přijímací i vysílací anténu platí reciprocity, to znamená, že veškeré parametry antény jsou platné jak pro příjem, tak pro vysílání.

Pro vysílací obvod se anténa jeví jako impedanční zátěž s určitou impedancí, značenou Z_A . Pro správnou funkci je nutné dodržet impedanční přizpůsobení antény a vedení, jinak dojde k odrazu na rozhraní konektoru a antény. Odražená vlna se sečte s původní vlnou a tím dojde ke ztrátám výkonu. Protože je impedance antény silně závislá na frekvenci, má každá anténa určitý rozsah frekvencí, pro který je použitelná. Tento rozsah se nazývá šířka pásma. Jde o rozsah frekvencí, pro který je činitel odrazu v určitém zvoleném rozsahu. Na obrázku 2 je příklad frekvenční závislosti impedance rezonanční antény a vyznačena šířka pásma pro činitel odrazu -20dB.

Další vlastností každé antény je její směrová charakteristika. K jejímu popisu se využívá sférická souřadná soustava. V té je směr popsán úhly φ (azimut $0^\circ - 360^\circ$) a ϑ (elevace $-90^\circ - 90^\circ$). Pro popis této charakteristiky se používá buď 3D graf nebo vertikální a horizontální řezy. Příklad charakteristiky je na obrázku 3.



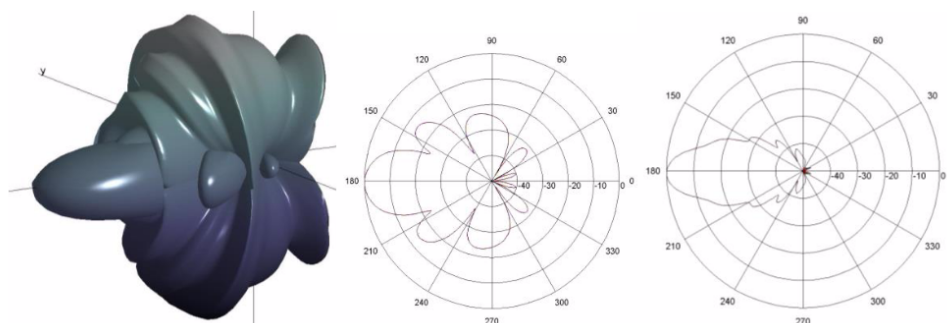
Obrázek 2: Frekvenční závislost a šířka pásma rezonanční antény, Zdroj: [1]

2.1.2 Spoje

Z hlediska typu spoje lze rádiové systémy rozdělit na dvoubodový spoj (point-to-point), bod-více bodu (point-to-multipoint) a vícebodový spoj (all-to-all). Point-to-point spojení se vyznačuje tím, že jsou spojeny dva (obvykle pevné) body. Příkladem point-to-point spojení může být vysokokapacitní spojení mezi ústřednou a základovou stanicí mobilního operátora.

U point-to-multipoint komunikuje jeden hlavní účastník a několik klientů. Komunikace probíhá pouze mezi hlavním účastníkem a klientem a opačně, nikoliv mezi klienty přímo. Cílem návrhu takového spojení je obvykle pokrytí nějakého konkrétního prostoru, např. města a minimálně na straně hlavního účastníka se používají všesměrové antény. Příkladem takového systému je např. Wi-Fi, Televizní vysílání nebo mobilní síť.

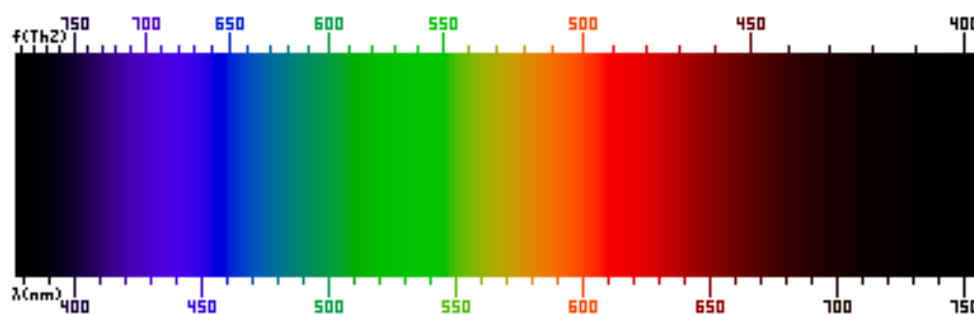
U all-to-all systému komunikuje každý klient s každým a používají se obvykle všesměrové antény.



Obrázek 3: Směrová charakteristika směrové antény, Zdroj: [1]

2.2 Světlo

Viditelné světlo je elektromagnetické vlnění s vlnovou délkou přibližně 380nm až 720nm. Rozdílné vlnové délky vnímáme jako odlišné barvy, podrobně viz obrázek 4. Detailnější popis světla, zejména z hlediska počítačové grafiky, je k dispozici v [2].



Obrázek 4: Vnímání barva dle vlnové délky, Zdroj: Wikipedia

Běžný zdroj světla vyzařuje několik vlnových délek najednou. Zdroje bílého světla jako slunce nebo žárovka vyzařují všechny viditelné vlnové délky najednou a někdy navíc i neviditelné, jako infračervené záření. Spektrální složení vlnových délek a jejich intenzita určuje jakou barvu bude lidské oko vnímat. Část vlnových délek je po dopadu na objekt a následném odrazu pohlcena. To, jaké vlnové délky objekt pohlcuje a jaké odráží, určuje jeho vnímanou barvu. Vlnová délka s nejvyšším zastoupením se nazývá dominantní barva.

Kromě barvy u světla lidské oko vnímá i další vlastnosti:

- Jas, intenzita, svítivost (luminosity) intenzita světla, čím vyšší intenzita tím se zdroj světla jeví jasnější

- Sytost (saturation) Čistota barvy. Čím vyšší sytost, tím je zastoupené užší spektrum vlnové délky
- Světlost (brightness) Množství nebarevné složky, tedy množství bílého světla

3 Počítačová grafika a raytracing

V počítačové grafice je velice důležitou disciplínou zobrazování prostorových dat neboli rendering. Jde o proces, kdy se z 3D scény vytváří 2D obraz. Snahou je, aby tento obraz byl co nejvěrnější tomu, co by vidělo lidské oko. Aby bylo možné provést tento proces, je zjednodušeně řečeno potřeba vyřešit tři základní úlohy: osvětlení, pohled scény a vytvoření rastrového obrazu.

Osvětlení je nutné pro správné určení barvy objektů ve scéně. Vnímaná barva totiž silně závisí na osvětlení tohoto objektu a úhlu pozorování. Osvětlením se rozumí světlo dopadající na tento objekt, a to závisí na umístění zdrojů světla, spektrální složení světla z nich vyzařovaného, ale i na ostatních objektech ve scéně ze kterých se může světlo odrážet a osvětlovat tak jiné objekty. Osvětlení je výpočetně poměrně složitá úloha a je i důvodem existence raytracingu.

Vyřešení pohledu na scénu znamená nejen umístění kamery do scény, ale i určení jejího promítání. Kromě toho je třeba vyřešit viditelnost objektů, tedy jejich zakrývání ostatními objekty. V poslední řadě je třeba vytvořit 2D rastrový obraz, tedy určit barvy jednotlivých pixelů v obrazu. K tomu je třeba využít osvětlovací modely jednotlivých objektů, viditelnost objektů.

Ve skutečné scéně pozorované v reálném světě je vjem ze scény dán fotony, které dorazí do lidského oka. Fotony jsou vyslány ze zdroje světla (slunce, žárovka, atd.) do scény. Tam musí v první řadě projít médiem (typicky vzduchem) a následně mohou dopadnout na nějaký objekt. Po dopadu dochází k odrazu, průchodu do materiálu, pohlcení, nebo dokonce k fluorescenci. Fotony, které odrazí, vytváří pozorovaný vjem. Pro zobrazení scény by bylo tedy možné simulovat jednotlivé fotony a jejich interakci se scénou. To je však výpočetně nerealizovatelné, protože fotonů je obrovské množství. Navíc pouze malá část fotonů vyslaných ze světelných zdrojů dorazí do oka, respektive kamery, a má tak nějaký vliv na zobrazovanou scénu. Je proto nutné problém zjednodušit.

Tradiční a stále asi ještě nejpoužívanější metodou zobrazování je rasterizace. Tato metoda používá poměrně přímý přístup k převodu 3D vektorových dat na 2D rastr. V první řadě převede objekty v 3D prostoru do obrazových souřadnic. K tomu používá transformace, které reprezentují umístění objektu v 3D prostoru, ale i pozici a projekci kamery. Po této transformaci jsou vektorová data umístěna v souřadnicích obrazu. Následně je vyřešena viditelnost, tedy zobrazení pouze objektů, které nejsou zakryty. Poté už se pro-

vede samotná rasterizace, tedy převod vektorových dat (typicky trojúhelníků) na pixely.

Rasterizace v základní podobě vůbec nemusí řešit vliv osvětlení, pouze vykresluje fixní barvu objektu nezávislou na osvětlení. Rozšíření metody o výpočet barvy dle nějakého lokálního osvětlovacího modelu je poměrně jednoduché, avšak kvůli charakteru metody nejsou simulovány jevy při šíření světla a pokud je žádoucí je zohlednit, je třeba je simulovat jinými metodami a zohlednit je ve výsledné barvě a jasu. Jevy které nejsou závislé na ostatních objektech ve scéně je poměrně jednoduché implementovat - například závislost barvy na přímém nasvícení světlem. Větším problémem jsou jevy jako je osvětlení objektu odrazem od jiného objektu, nebo třeba i zastínění. Tyto problémy je nutné řešit často poměrně komplikovanými algoritmy, které ale většinou pouze napodobují skutečný jev, aby výsledek byl podobný skutečnému vjemu, ale nesimulují šíření světla přímo. Obrovskou výhodou této metody je její rychlost. Ta pramení zejména z její přímočarosti, z podpory hardwaru (GPU), ale třeba i z toho, že lze provádět výpočty pouze pro to, co je skutečně vidět, a redukovat tak výpočty u jinak velké scény. Nevýhodou je, že výše zmíněné jevy je nutné napodobovat často komplikovanými algoritmy.

Omezení rasterizace řeší globální osvětlovací metody. Ty na rozdíl od ní alespoň napodobují skutečné šíření světla, včetně ovlivňování objektů ve scéně mezi sebou. Implicitně tedy řeší například zastínění objektů, osvětlení objektu odrazem z jiného objektu, nebo někdy i kaustiky.

Všechny globální osvětlovací metody alespoň částečně řeší zobrazovací rovnici. Tu lze zapsat ve tvaru:

$$L_o(x, \vec{\omega}) = L_e(x, \vec{\omega}) + L_r(x, \vec{\omega}) = L_e(x, \vec{\omega}) + \int_{\Omega} f(x, \vec{\omega}, \vec{\omega}_i) L_i(x, \vec{\omega}_i) \cos\theta d\vec{\omega}_i \quad (2)$$

Rovnice vyjadřuje vyzářenou radianci L_o [$\text{Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}$] v bodě x , ve směru daném vektorem $\vec{\omega}$. Tu lze vyjádřit jako součet vlastní vyzářené radiance L_e , a radiance odražené L_r . Odraženou radianci lze zároveň vyjádřit integrálem přes polokouli Ω z funkce f , což je dvousměrová distribuční funkce BRDF (viz kapitola 5.3.1) a radiance L_i dopadající na plochu.

Protože s takto definovanou rovnicí se špatně pracuje, lze ji přepsat do podoby, kdy se odražená radiance vypočítá integrálem přes všechny ostatní plochy ve scéně se započtením jejich viditelnosti, vzájemné orientaci atd. viz [2]. Vyčíslením této rovnice pro každý pixel kamery by byla radiance, ze které lze vyjádřit barvu. Rovnice při dodržení určitých podmínek popisuje skutečné šíření světla ve scéně a díky tomu poskytuje fotorealistické

obrazy. Problém je, že analytické vyčíslení této rovnice pro obecný případ není možné. Používají se různá aproximační řešení, která poskytují alespoň částečné vyčíslení této rovnice.

Klasickou metodou aproximačního řešení zobrazovací rovnice je raytracing, neboli sledování paprsku. Jde o metodu, která sleduje tok fotonů opačným směrem než se ve skutečnosti pohybují (od pozorovatele do zdroje světla), jedná se o tzv. gathering metodu [2]. Metoda postupně sbírá energii, kterou paprsek na své dráze akumuluje. Důvod tohoto opačného sledování je jednoduchý – naprostá většina světla vyslaná zdroji světla nedorazí do oka pozorovatele, a proto nemají žádný vliv na výsledek. Tímto způsobem je možné omezit řešení pouze na paprsky, které mají vliv na výsledek.

Algoritmus pracuje tak, že pro každý pixel obrazu vyšle paprsek, který prochází středem tohoto pixelu a nalezne ve scéně první plochu, kterou protne. Po protnutí objektu se určí barva, dle osvětlení bodu protnutí. To se provede tak, že jsou vyslány paprsky do všech zdrojů světla. Z těch se zjistí, zda je bod zastíněný jiným objektem. Pokud není, připočte se k výsledné barvě příspěvek z daného světla přepočítaný BRDF funkcí. V případě, že je objekt odrazivý, připočte se příspěvek paprsku odraženého. Příspěvek tohoto paprsku se vypočte podobně jako u původního paprsku, obvykle zavoláním rekurzivní funkce. V případě, že objekt je průsvitný se stejným způsobem určí i příspěvek paprsku, který prošel objektem. Je zřejmé, že je nutné nějaká podmínka ukončení, protože v případě dvou odrazivých ploch umístěných naproti sobě, by se paprsek mohl odrážet do nekonečna.

Tato varianta raytracingu neposkytuje kompletní řešení zobrazovací rovnice. Kaustiky, plošné světelné zdroje a difúzně-difúzní odrazy metoda simulovat neumí. Dalším zástupcem gathering metody je například path tracing [2], neboli sledování cesty.

Druhou kategorií metod řešící zobrazovací rovnici, jsou metody vycházející ze světelného zdroje, tedy shooting metody. Obecně lze říci, že tyto metody vystřelují paprsky ze světelného zdroje do scény, tedy dle skutečného směru fotonů. Dráha paprsků je s odrazy, lomy atd. rekurzivně sledována a pro každý průsečík se vypočítá množství světla, které jde k pozorovateli. To se provede vysláním paprsku k pozorovateli a určením jaký pixel protne. Protnutému pixelu přispěje radiancí, respektive barvou. Problém těchto metod je, že mohou potencionálně sledovat velké množství paprsků zbytečně, protože do výsledného obrazu vůbec nepřispějí. Druhý problém je, že nelze přímo ovlivnit počet paprsků, které přispívají danému pixelu, a tak nezbyvá jiná možnost než generovat velké množství paprsků, dokud výsledek nebude dostatečně přesný.

Třetí kategorií jsou dvousměrné metody, kdy část paprsků je generuje od pozorovatele a část ze zdrojů světla. Tím se spojí výhody obou předchozích metod a odstraní jejich omezení. Zástupcem těchto metod je dvousměrové sledování cesty a fotonové mapy.

4 Rádiové vlnění a raytracing

Vzhledem ke zvyšujícím se nárokům na rádiové služby, se zvyšují i nároky na návrh těchto systémů a s nimi požadavky na přesnější předpověď šíření signálu. V poslední době datová propustnost používaných služeb vzrostla o několik řádů. Příkladem budiž LTE (mobilní síť 4. generace) oproti GPRS, které dosahují přenosové rychlosti až 300Mbit/s oproti 114 Kbit/s u GPRS. Tyto rychlejší technologie jsou mnohem citlivější na všechny negativní vlivy při šíření vlnění, například útlum, díky vícestnému šíření signálu, rušení mezi jednotlivými buňkami a podobně.

Při použití simulace je možné, ještě ve fázi návrhu rádiového systému, rozhodnout o použitých technologiích, potřebných vysílacích výkonech, modulacích a podobně. Díky tomu lze zkrátit čas potřebný pro implementaci i snížit cenu. Dalším důvodem k simulaci je maximalizace využití pásma a omezení rušení ostatních služeb v okolí. Pokud se simulací minimalizuje potřebný vysílací výkon, vyberou co nejvhodnější antény a podobně, minimalizuje se i rušení okolních rádiových systémů a celkově využití pásma. To je zejména relevantní pro mobilní síť, ale i v 2,4GHz pásmu, které je volně použitelné a tím pádem velmi zatížené.

Příkladem, kde bude simulace relevantní, může být bezdrátový spoj v nerovném terénu, který spojuje dvě místa s přímou viditelností. Parametry vlnění, které jde přímo z vysílací do přijímací antény, lze vypočítat, ale problém je najít místa, přes které se signál může odrazit, případně podstoupit difrakci. Jednoduchou a často používanou metodou je, že se vezme 2D průřez terénem, mezi oběma anténami a tam se najdou místa, kde může docházet k odrazu, případně difrakci. Signál se ale může odrážet i mimo tento průřez, například od nedalekého kopce. Na to se hodí raytracing, který tyto potenciální místa odrazu dokáže nejen najít, ale rovnou vypočítat i některé parametry spoje, jako například impulsní odezvu. Díky simulaci je tak možné odhalit a řešit případné problémy předem. Například přemístěním vysílače nebo změnou výšky tak, aby nedocházelo k nežádoucímu odrazu, nebo se zmírnil jeho vliv.

Raytracingu se v radiotechnické terminologii rovněž říká optický model. Optický model

šíření vlny spočívá v nahrazení jednotlivých vln paprskem, který podléhá zákonům geometrické optiky. Simulace vlny je potom podobná raytracingu v počítačové grafice. Protože ale radiový signál má relativně velkou vlnovou délku oproti světlu, není toto nahrazení tak přímočaré jako v grafice. To je dáno tím, že objem rozhodný pro šíření elektromagnetické energie nemá nulovou tloušťku jako paprsek, a tak jej nelze v paprsku reprezentovat. To se projevuje například tak, že vlna se neodráží od jediného bodu, ale od určité nenulové plochy. Velikost této plochy je úměrná vlnové délce. Pro raytracing je tedy nutné zavést předpoklad, že jsou překážky větší než vlnová délka. Díky tomu není raytracing univerzálním nástrojem, ale hodí se jen pro určité situace. Příkladem, kde je víceméně splněna podmínka velikosti překážek, je třeba běžná zástavba a frekvence používané v mobilních službách. Využití raytracingu je zejména tam, kde chceme simulovat vliv vícecestného šíření. Na přímý přenos vlnění z antény do antény se hodí jiné metody.

Z hlediska toho, jak jsou vyhledávány paprsky zajímavé pro šíření signálu se rozlišují dvě metody optické simulace:

- Ray Launching - metoda, která vystřeluje paprsky z vysílací antény do všech směrů. Paprsky jsou vystřelovány v pravidelné úhlové separaci a po dopadu na překážku je vytvořen sekundární zdroj paprsků, které jsou dále simulovány, dokud paprsek nedojde do přijímací antény, nebo dokud není dosaženo ukončovacích podmínek (limit rekurze, malý energetický příspěvek paprsku apod.)
- Ray Tracing - metoda, která analyticky hledá možné cesty paprsků skrz prostředí do přijímací antény.

Obě metody mají své výhody i nevýhody, ray launching řeší problém iterativně od vysílací antény, kdežto ray tracing řeší problém přes celé prostředí. Problémem ray launchingu může být rozlišení vysílaných paprsků – při příliš malém počtu paprsků se snadno minou nějaké detaily v prostředí od kterých může být relevantní odraz.

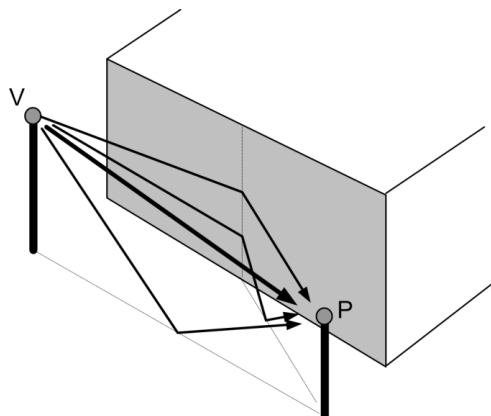
Interakce paprsků s prostředím spočívá nejen v jejich odrazech, ale zejména i difrakci. Odražených paprsků může být obecně nekonečno, což nelze simulovat v konečném čase. Vlna však po vícenásobném odrazu ztrácí energii a její příspěvek energie bude po větším počtu odrazů zanedbatelný, pro typické situace stačí cca 5-6 odrazů pro každý paprsek. Difrakce výrazně komplikuje výpočetní složitost raytracingu. Jde o jev, díky kterému se vlna dokáže dostat i za překážky díky ohybu. Vlna po difrakci však ztratí relativně velké množství energie a tak pro typické situace bude stačit simulovat jednu difrakci na paprsek. Podrobněji budou jednotlivé jevy popsány v kapitole 5.

Příspěvek paprsku v bodě se obecně vypočítá jako komplexní součet vektorů, pro zjednodušení, ale lze uvažovat součet fázorů, kde intenzita elektrického pole v bodě je rovna součtu příspěvků jednotlivých paprsků dopadajících do bodu. Příspěvek jednoho paprsku, vyjádřený jako intenzita elektrického pole, lze popsat pomocí vztahu: [1]

$$E_i = E_0 F(\vartheta, \varphi) \frac{e^{-jkd}}{d} \prod_{m=1}^M R_m \prod_{n=1}^N D_n \prod_{q=1}^Q P_q \quad (3)$$

kde:

- E_0 je konstanta [V/m] závislá na výkonu vysílače
- ϑ a φ jsou sférické souřadnice určující směr šíření paprsku od vysílací antény
- $F(\vartheta, \varphi)$ je normovaná amplitudová vyzářovací charakteristika vysílací antény
- d [m] celková délka paprsku
- $k = 2\pi/\lambda$ je vlnové číslo [m^{-1}]
- M celkový počet odrazů na dráze paprsku, R_m koeficient m -tého odrazu
- N celkový počet difrakcí na dráze paprsku, D_n je koeficient n -té difrakce
- Q celkový počet průchodů překážkami (např. stěnami) na dráze paprsku, P_q je koeficient q -tého prostupu



Obrázek 5: 2,5D metoda raytracingu, Zdroj: [1]

Uvedený vzorec vypadá relativně jednoduše, alespoň co se výpočtu týče. Složitě je však určení jednotlivých koeficientů, zejména u difrakce.

Protože největší výpočetní složitost simulace tvoří vyhledávání tras paprsků, občas se pro radiotechniku používá zajímavé zjednodušení pro zástavbu, takzvaná 2,5D metoda. Ta spočívá v tom, že se výška budov uvažuje jako nekonečná a raytracing se provede ve 2D půdorysu zástavby. Po vyřešení 2D případu se vypočte příspěvek od paprsků se stejnou dráhou, pouze odražených od země. Viz obrázek 5. Tato metoda řádově sníží počet simulovaných paprsků oproti simulaci ve 3D a šetří tak čas a výpočetní výkon.

5 Srovnání jevů a veličin

Tato kapitola bude srovnávat jednotlivé jevy a veličiny které jsou zajímavé pro simulaci šíření, potažmo pro raytracing. Podkapitoly budou věnovány veličinám a následně jednotlivým jevům, jako je např. odraz, difrakce a polarizace.

5.1 Veličiny pro světlo

Pro kvantifikaci světla lze použít fotometrické veličiny. Ty jsou odvozeny od vnímání světla lidským okem, kvantitativně odvozené od velikosti možného vjemu. Radiometrické veličiny jsou na oku nezávislé, jsou proto svým způsobem objektivnější a zároveň teoreticky univerzálnější pro obě disciplíny. Kvůli tomu se používají pro popis světla spíše radiometrické.

Základní částicí světla i rádiové vlny je foton. Jde o nejmenší možné záření, jeho energie je: [2]

$$e_\lambda = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad [\text{J}], \quad (4)$$

kde $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ je Planckova konstanta, c je rychlost světla ve vakuu.

Radiantní energie Q [J] je energie fotonů určité vlnové délky v určité oblasti. Jde o součet energií fotonů v místě. Pro n_λ fotonů s vlnovou délkou λ s energií e_λ se určí jako integrál: [2]

$$Q = \int_0^\infty n_\lambda e_\lambda d\lambda \quad (5)$$

Světlo nebo rádiový signál dopadající nebo vyzářené z povrchu v čase reprezentuje zářivý výkon, radiant power, nebo též zářivý tok. Jednotkou je watt [$\text{W} = \text{Js}^{-1}$]. Vyjadřuje množství přijaté nebo vyzářené energie za čas. Vypočítá se jako změna radiantní energie za jednotku času: [2]

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (6)$$

Zářivý tok dopadající na plochu je irradiance (E). Zářivý tok vyzařovaný z plochy je radiozita, též radiosity, radiant exitance, značeno M , nebo B . Radiozita může vyjadřovat jak energii emitovanou (světlem nebo rádiovým vysílačem), tak energii odraženou od plochy. Jednotka obou je [Wm^2] a vypočítá se jako změna dopadajícího, respektive vyzářeného výkonu na ploše A : [2]

$$E = M = B = \frac{d\phi}{dA} \quad (7)$$

5.1 Veličiny pro světlo

Tabulka 2: Fotometrické veličiny

veličina	symbol	jednotka SI	označení	poznámka
světelná energie	Q_V	lumen sekunda	$lm.s$	zářivá energie vyvolávající světelný vjem ohodnocená velikostí vjemu
světelný tok	ϕ, F	lumen	$lm(= cd.sr)$	světelná energie za jednotku času procházející určitou plochou, někdy označovaný jako světelný výkon
svítivost	I, I_V	kandela	$cd = (lm.sr^{-1})$	základní jednotka SI
jas	L, L_V	kandela na metr čtverečný	$cd.m^{-2}$	světelný tok do jednotkového prostorového úhlu na "promítnutou" jednotkovou plochu zdroje
osvětlení	E_V	lux	$lx = (lm.m^{-2})$	světelný tok dopadající na plochu
světlení	H_V, M_V	lumen na metr čtverečný	$lm.m^{-2}$	světelný tok emitovaný plochou zdroje
světelná účinnost	K	lumen na watt	$lm.W^{-1}$	poměr světelného toku k zářivému toku

Zářivá intenzita I je hustota výkonu v prostorovém úhlu. Vypočítá se jako světelný tok ϕ v prostorovém úhlu $d\vec{\omega}$: [2]

$$I = \frac{d\phi}{d\vec{\omega}} \quad (8)$$

Radiance udává přijímaný nebo vyzářený výkon na jednotkovém prostorovém úhlu na jednotku kolmo promítnuté plochy. Lze si ji představit jako počet fotonů v přicházejících nebo vyzářených v určitém směru za jednotku času a procházející průmětem diferenciální plošky dA , který je kolmý na tento směr. Udává pro určitý bod x a směr učený vektorem $\vec{\omega}$ jako: [2]

$$L(x, \vec{\omega}) = \frac{d^2\phi}{\cos\Theta dA d\vec{\omega}} \quad (9)$$

Tato veličina je velmi důležitá pro grafiku, protože to je to, co označujeme jako barvu paprsku. Zároveň z ni lze vyjádřit všechny výše uvedené veličiny.

Všechny výše uvedené veličiny se nazývají radiometrické, a paradoxně se používají spíše pro světlo než pro radiové vlny. Jsou ale aplikovatelné obecně na elektromagnetické vlnění, tedy i rádiový signál a světlo. Tabulka 2 uvádí fotometrické veličiny. Jejich význam a definice je obdobná jako u radiometrických, ale používají jednotky odvozené od vnímání lidského oka. Konkrétně kandela, lumen a lux. Kandela je základní jednotka SI, definovaná jako svítivost světelného zdroje, který v daném směru vyzářuje monochromatické světlo o frekvenci 540.10^{12}Hz a jehož zářivost v tomto směru činí $\frac{1}{683}$ wattů na jeden steradián. Lumen a lux jsou odvozené od kandely. Zvolená frekvence je blízká zelené barvě (vlnová délka 555nm), protože lidské oko je nejcitlivější právě na zelenou barvu.

Veškeré veličiny závislé na vlnové délce lze uvádět buď pro určitou vlnovou délku, nebo celkově pro všechny vlnové délky (u fotometrických veličin všechny viditelné vlnové délky) .

Spektrální veličina je pro jednu určitou vlnovou délku, kdežto integrální veličiny kvantifikují účinek všech vlnových délek najednou.

5.2 Veličiny pro rádiové vlny

Všechny výše uvedené jednotky používané pro světlo, byly odvozeny od fotonu, tedy od nejmenšího možného záření. V radiotechnice je ale praktičtější používat veličiny odvozené, nebo snadněji převeditelné na elektronické veličiny, jako je napětí a výkon.

Protože elektromagnetické pole se skládá z elektronické a magnetické složky, používají se dvě základní veličiny. Intenzita elektrického pole a intenzita magnetického pole. Intenzita elektrického pole \vec{E} je definovaná ze síly \vec{F} , kterou působí na elektrický náboj q vztahem:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (10)$$

Jednotkou je newton na coulomb [$\text{N} \cdot \text{C}^{-1}$] nebo ekvivalentní volt na metr [$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$]. Intenzita elektromagnetického pole je to, co kvantifikuje, laicky řečeno, sílu signálu v nějakém místě.

Intenzita magnetického pole se označuje jako \vec{H} a lze ji v případě, že jde vlnu se složkou pouze v kolmém směru na směr šíření, odvodit od intenzity elektrického pole \vec{E} s pomocí vlnové impedance prostředí Z .

$$\vec{H} = \frac{\vec{E}}{Z} \quad (11)$$

Pro vákuum, a přibližně i pro vzduch, platí $Z = 120\pi$.

Intenzita elektrického i magnetického pole jsou vektorové veličiny, které se mění s tím, jak vlna kmitá. Maximální velikost tohoto kmitu u harmonické vlny je amplituda. Jde o skalární číslo, které kvantifikuje intenzitu bez ohledu na její směr, polarizaci a momentální fázi.

Fáze harmonické vlny je bezrozměrná veličina, která určuje vztah charakteristické veličiny vlny k danému místu a času a ke stavu charakteristické veličiny vlny v časovém a prostoro-rovém počátku.

Dalším důležitým parametrem vlny je polarizace. Ta definuje směr a otáčení intenzity elektrického pole. Laicky řečeno, kterým směrem pole kmitá, případně jak se tento směr mění s fází. V radiotechnice se polarizace rozlišuje na lineární, kruhovou, popřípadě eliptickou. Vlnění může rovněž být polarizačně nekoherentní, tedy bez jednotné polarizace. To je

typické pro světelné zdroje, v radiotechnice jsou typicky antény zdrojem nějaké konkrétní polarizace.

Výkon je závislý na anténě, přijatý výkon P_p [W] pro izotropický zářič (ideální všesměrová anténa) vypočítat z elektrické intenzity E [V.m⁻¹] dle:

$$P_p = \frac{E^2}{120\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (12)$$

Z hlediska rádiového spoje je velice důležitý útlum L). Jde o poměr výkonů, ten lze vyjádřit jako poměr intenzit elektrického pole, ale je třeba intenzity umocnit, pro získání poměru úměrného výkonům, viz:

$$L = \frac{P}{P_0} \quad (13)$$

$$L = \frac{|E|^2}{|E_0|^2} \quad (14)$$

Pomocí útlumu lze vyjádřit jaká poměrná část z vyslané energie došla do určitého místa, nebo jaká poměrná část výkonu vyslané vysílací anténou byla přijata přijímací anténou.

Přijatý výkon i intenzitu ovlivňuje řada faktorů, kromě jiného ztráty šířením, zisk antény atd. Útlum šířením v prostředí je obvykle velké číslo (může být na úrovni až 10¹²), kdežto zisk antény ($G = \frac{1}{L}$) může být v řádu tisíců. S takto rozdílnými čísly se špatně pracuje a proto se pro jejich vyjádření používají decibely (dB). Decibel je desetina belu, a je definován jako poměr dvou výkonů dle:

$$10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \quad (15)$$

Decibel tedy vyjadřuje poměr dvou výkonů, pokud chceme vyjádřit poměr napětí nebo intenzit, je třeba intenzitu umocnit abychom dostali poměr úměrný výkonu:

$$10 \log_{10} \frac{U_1^2}{U_2^2} = 20 \log_{10} \frac{U_1}{U_2} \quad (16)$$

Útlum intenzity nebo výkonu se tedy vypočítá jako:

$$L = 20 \log_{10} \frac{|E|}{|E_0|} \quad (17)$$

$$L = 10 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad (18)$$

5.3 Odraz

Odraz je jev, ke kterému může dojít, když se vlna dostane na rozhraní dvou různých prostředí. Na tomto rozhraní může dojít k jeho odrazu do prostředí odkud přišlo, ale část vlny zároveň může lomem (refrakcí) projít do druhého prostředí, tomu je ale věnována speciální kapitola 5.4.

5.3.1 Odraz světla

Pro grafiku je odraz naprosto stěžejní, protože naprostá většina světla vnímaného ve scéně pochází právě z odrazů od povrchu objektů. Světlo dopadající do oka přímo ze světelného zdroje je spíš výjimkou.

Vlnění dopadající na rozhraní materiálu se odráží dle Snellova zákona. Ten zjednodušeně říká, že úhel dopadu je roven úhlu odrazu. To však platí pro dokonale rovné a dokonale odrazivé plochy. U světla se takovému ideálnímu povrchu blíží zrcadlo, většina ostatních povrchů má určitou mikrostrukturu, které odrážející se paprsky rozptyluje do všech různých směrů. Kromě toho tu jsou různé další efekty jako podpovrchové rozptylování (subsurface scattering), které odraz dále komplikují. Tyto efekty jsou výraznější u světla, díky jeho nízké vlnové délce (relativně k mikrostruktuře materiálu).

Při odrazu světla je část energie vlny odražena (část pohlcena, část projde skrz atd.). Různé vlnové délky jsou přitom pohlcovány nebo odráženy s různou intenzitou. Lidské oko spektrum odražené vlny interpretuje jako barvu. To znamená, že vnímaná barva objektu závisí na tom jak objekt odráží jednotlivé vlnové délky. To se navíc liší dle směru pozorování. Vliv na barvu má i dopadající světlo a nejen ze směru daném zákonem odrazu, ale ze všech směrů. Je zřejmé, že je tento jev třeba nějak vyjádřit, k tomu slouží BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function). Tato funkce (za určitých předpokladů) vyjadřuje poměr odražené radiance v daném bodě x , označené jako $dL_r(x, \vec{\omega}_r)$ ke vstupní diferencíální radianci $dL_i(x, \vec{\omega}_i)$ promítnuté na kolmou plochu [2]:

$$f_r(x, \vec{\omega}_r, \vec{\omega}_i) = \frac{dL_r(x, \vec{\omega}_r)}{dL_i(x, \vec{\omega}_i)(\vec{\omega}_i, \vec{n})d\vec{\omega}_i} \quad (19)$$

Obecný analytický popis této funkce není vždy možný, proto se pro vykreslování používají jednodušší, často empirické funkce nebo tabulky pro jednotlivé materiály, ze kterých se hodnota BRDF interpoluje. Příkladem, a zřejmě i nejpoužívanější empirickou aproximací je Phongův osvětlovací model.

V grafice se zavádí speciální typy odrazů a jejich kombinacemi lze poté částečně popsat vlastnosti materiálu. Prvním typem odrazu je difuzní odraz. U tohoto odrazu se dopadlá vlna rozptýluje do všech směrů. Příkladem materiálu, který vykazuje odraz blížící se dokonalému difuznímu odrazu je křída. Dalším typem odrazu je zrcadlový, neboli spekulární. Ten odpovídá zákonu odrazu, kdy se světlo odráží pouze jedním směrem. Posledním typem je lesklý odraz. Ten je důsledkem jevu, kdy se paprsek světla dostává pod povrch materiálu, kde je několika násobně stíněn a rozptýlován. To má vliv na směr odrazu, který je poté odchýlen od zrcadlového směru.

5.3.2 Odraz rádiové vlny

U modelování šíření rádiové vlny hraje odraz také důležitou roli. Při přímé viditelnosti vysílací a přijímací antény může signál dorazit přímo, kdežto při vnímání scény je světlo, které by šlo z jeho zdroje přímo do oka, spíše výjimkou. Odraz však hraje důležitou roli v tom, že společně s difrakcí umožňuje signálu dostat se do míst, kam by se jinak přijmou viditelností nedostal. Zároveň díky odrazům dochází k vícecestnému šíření signálu, což může být naopak nežádoucí jev, se kterým je třeba počítat, protože dojde k interferenci více vln a ty se v přijímací anténě mohou za určitých podmínek částečně vyrušit.

U rádiové vlny se odraz řídí stejnými zákony, avšak díky větší vlnové délce nejsou některé jevy z hlediska modelování šíření tolik významné, zatímco je oproti grafice třeba simulovat jevy jiné.

Pro rádiový signál by určitě šlo vyjádřit obdobu BRDF, avšak v mnoha případech to nebude potřeba, protože lze vystačit se zrcadlovým odrazem. To je způsobeno zejména tím, že hrubost většiny povrchů není tak významná, v poměru k vlnové délce, jako u grafiky. Dále také proto, že intenzita difuzně odražených paprsků není tak významná, a tím není významný ani efekt, který by tyto paprsky měly na simulaci. Chyby způsobené nedokonalou přesným popisem scény a nepřesnou aproximací skutečných jevů jsou obvykle vyšší.

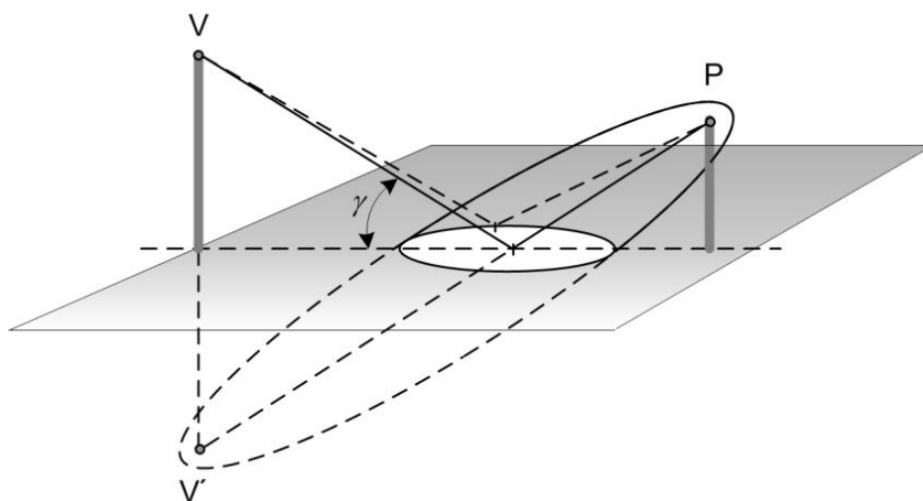
Dle [3] platí, že povrch je považován za hrubý, když platí:

$$h > \frac{\lambda}{8\cos\theta} \quad (20)$$

kde λ je vlnová délka, θ je úhel dopadu (měřený od normály povrchu). V případě, že je považován touto nerovnicí za hladký, stačí uvažovat ideální zrcadlový odraz. Pokud je povrch považován za hrubý, část vlny bude rozptýlena podobně jako difuzní odraz u světla.

Pomocí empirických vzorečků (viz [3]) lze spočítat ztráty způsobené rozptylem a korigovat tak intenzitu zrcadlového odrazu.

Vzhledem k vlnovému charakteru rádiových vln je pro odraz rozhodná určitá plocha, ta je definovaná první Fresnelovo zónou. Podrobná definice Fresnelovo zón je v [1]. Zjednodušeně řečeno lze říci, že mají tvar elipsy. V případě odrazu je rozhodná plocha dána průsečíkem této elipsy na plochu odrazu. Pro dokonalý odraz je nutné, aby plocha byla dostatečně velká pro pokrytí celé rozhodné plochy. V případě, že tato plocha není dostatečně velká, dojde k odrazu pouze části energie. Pro raytracing je tedy nutné uvažovat předpoklad, že překážky jsou dostatečně velké vzhledem k vlnové délce, případně korigovat koeficient odrazu velikostí plochy. Situaci pro dálkový spoj ilustruje obrázek 6.



Obrázek 6: Plocha rozhodná pro odraz, Zdroj: [1]

Při odrazu se dále mění polarizace vlny, více o tomto jevu v kapitole o polarizaci 5.7.

5.4 Lom (refrakce) a průchod materiály

Lom je jev, ke kterému podobně jako k odrazu, dochází na rozhraní dvou prostředí. Oba jevy nastávají najednou, tady část vlny se odrazí a část pronikne dovnitř druhého prostředí.

Lom definuje Snellův zákon, dle kterého úhel lomu závisí na poměru rychlosti šíření vlny

obou prostředí, tj. poměru indexu lomu:

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (21)$$

V grafice je lom důležitý pro zobrazování průhledných předmětů. U některých předmětů lze kromě lomu paprsků z přímé viditelnosti pozorovat lom paprsků ze zdroje světla, takzvané kaustiky. Příklad je sklenice s vodou, kdy se lomené paprsky projevují jako místa s vysokou intenzitou světla. Lom také nastává na vodní hladině a její zobrazování je poměrně velké téma v počítačové grafice.

U simulace šíření rádiové vlny je lom také důležitý, zejména uvnitř budov. V otevřeném terénu nehraje lom tak velkou roli, protože po průchodu terénní nerovností je útlum vlny tak vysoký, že je její příspěvek zanedbatelný. V zástavbě se průchod budovami obvykle také zanedbává, ne však jenom proto, že průchod budovou způsobuje velký útlum, ale také proto, že by bylo třeba znát vnitřní strukturu budovy a takovéto informace nejsou většinou k dispozici.

Vlastnosti prostředí, které ovlivňují šíření elektromagnetické vlny, jsou permitivita, permeabilita a konduktivita. Permitivita je veličina popisující vztah mezi vektory intenzity elektrického pole a elektrické indukce v materiálu nebo vakuu. Značí se řeckým písmenem ϵ a v lineárním homogenním izotropním prostředí platí:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (22)$$

Permeabilita je veličina popisující vztah mezi vektory magnetického pole a magnetické indukce. Značí se písmenem μ a v lineárním homogenním izotropním prostředí platí:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (23)$$

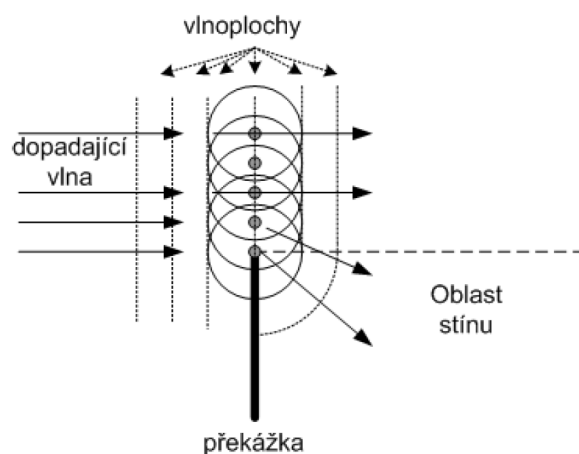
Konduktivita (vodivost) je veličina popisující vztah mezi vektory intenzity elektrického pole a proudové hustoty. Značí se písmenem σ a v lineárním homogenním prostředí platí:

$$\vec{j} = \sigma \vec{e} \quad (24)$$

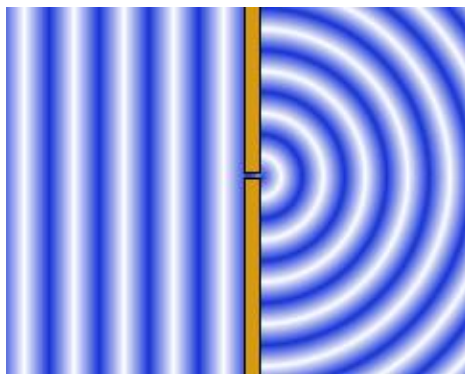
V modelech pro šíření rádiové vlny se vliv lomu obvykle zanedbává, důležitý je spíše útlum průchodem prostředí. Změna směru vlny, respektive paprsku nehraje zásadní roli, kvůli velikosti vlnoploch. V grafice je změna směru paprsku poměrně důležitá u některých průsvitných materiálů a zejména u vody.

5.5 Difrakce

Difrakce vlnění je jev, díky kterému se vlnění dostane i do oblasti geometrického stínu. Vysvětlit jej lze Huygensovým principem, který říká, že každý bod vlnoplochy šířícího se vlnění se opět stává všesměrovým vlněním. V případě překážky se tak její okraj stane zdrojem vlnění, které poté po difrakci směřuje i do oblasti stínu od zdroje vlnění.



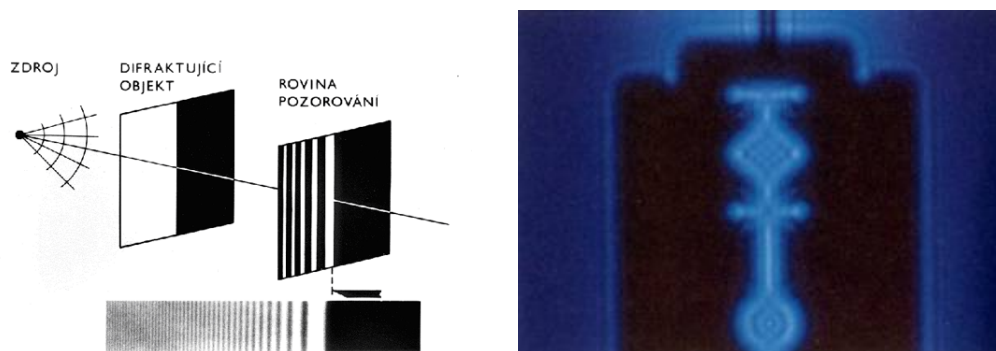
Obrázek 7: Difrakce vlnění na překážce, Zdroj: [1]



Obrázek 8: Difrakce na bodové štěrbině (Fresnelovy kroužky), Zdroj: Wikipedia

Difrakce je (mimo jiné) závislá na vlnové délce a velikosti překážky. Větší vlnové délky se ohýbají více nežli nižší. Stejně tak čím menší překážka, v poměru k vlnové délce, tím je útlum difrakcí nižší. Proto je difrakce mnohem významnějším jevem pro rádiové vlny nežli pro světlo.

V určitých podmínkách lze difrakci pozorovat i u světla. Například při stínění objektem, kdy hrana stínu není ostrá, ale díky interferenci ji tvoří střídavě světlé a tmavé proužky. Aby tento efekt byl viditelný, musí být světlo monochromatické, například z laseru. Viz obrázek 9. Pokud monochromatické není, jednotlivé proužky se slévají v neostrý stín vlivem různé difrakce různých vlnových délek.

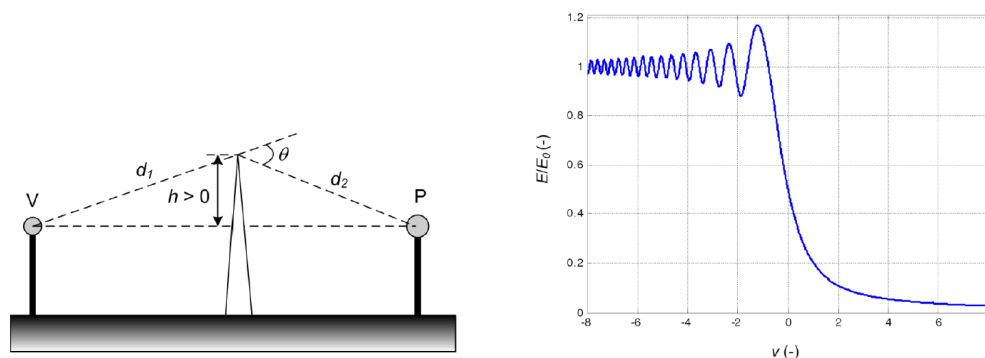


Obrázek 9: Difrakce světla z na překážce, Zdroj: [4]

Takovéto podmínky, při kterých by efekt difrakce byl výrazný, v běžných scénách počítačové grafiky nenastávají, přesto existují práce, které jej simulují [5] [6]. Měkké stíny lze přesto často pozorovat. Je to však proto, že naprostá většina reálných zdrojů světla není bodová, ale má určitou plochu ze které vychází světlo. Zdroj světla je proto překážkou zastiňován postupně a vytváří měkký stín. Tento efekt v grafice výrazně převažuje efekt difrakce pro objekty běžných rozměrů. Proto lze difrakci v grafice pro běžné scény bez újmy na přesnosti zobrazení zanedbat a místo ní simulovat plošné zdroje světla místo bodových.

Pro rádiový signál je oproti tomu difrakce velice důležitá. Společně s odrazy a průchodem překážkami umožňuje signálu dostat se do oblastí, kde jinak není přímá viditelnost na vysílací anténu. Kromě toho ale ovlivňuje i intenzitu vlnění na přímou viditelnost, díky útlumu difrakcí (zastíněním). Modelová situace s difrakcí je na obrázku 10. Mezi vysílací a přijímací anténu je umístěna překážka, která zakrývá obě antény a její výška se mění. Graf vpravo poté ukazuje poměrnou intenzitu přijatého vlnění (E/E_0) v přijímací anténě v závislosti na zastínění překážkou v . Ta postupně klesá s velikostí překážky. Zároveň je vidět jak se mění interferenční charakter nezastíněného signálu, díky postupnému zastiňování Fresnelových zón (viz [1]).

Difrakce je důsledkem Huygensova principu, kdy je elementárním zdrojem vlnění každý bod vlnoplochy. To by z pro raytracing znamenalo pokrýt prostor zdroji vlnění a z nich do



Obrázek 10: Difrakce u rádiového spoje a poměrná intenzita signálu v závislosti na velikosti překážky, Zdroj: [1]

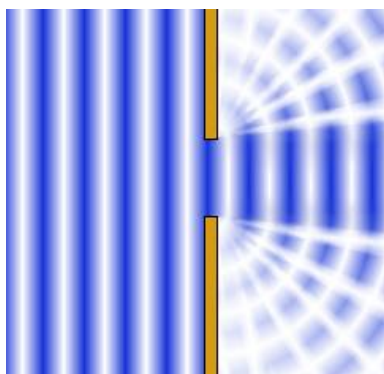
všech směrů vysílat další paprsky. To je výpočetně neřešitelné a proto se počet zdrojů světla omezuje jejich umístěním pouze na hrany objektů, což je možné dle Huygenovo–Fresnelovo teorie. Z těchto zdrojů vlnění na hranách jsou vysílány další paprsky, jejich intenzita se vypočítá z intenzity vlnění dopadající na hranu a koeficientu difrakce. Určení koeficientu difrakce je komplikovaná záležitost, proto se často určuje empiricky. Směr difrakčních paprsků se obvykle omezuje na kužel, kde je efekt difrakce ještě významný, protože jeho efekt se snižuje s rostoucím úhlem "lomu" paprsku. Konkrétní matematický aparát pro výpočty difrakce poskytuje UTD (Uniform Theory of Diffraction) a GTD (Geometric Theory of Diffraction), více informací o těchto teoriích popisuje například [7].

5.6 Interference

Interference je jev, ke kterému dochází při superpozici dvou či více vln. Výsledná intenzita je dána vektorovým součtem jejich intenzit, který se mění s fází vlny. To znamená, že vlny se mohou v určitých místech vzájemně zesilovat a v jiném místě vzájemně rušit. To, jak bude vypadat výsledná intenzita po součtu, závisí na fázovém posuvu obou vln, jejich směru, frekvenci a podobně.

K interferenci světla dochází například po difrakci na malé štěrbině, to ilustruje obrázek 11. Vlny z různých částí štěrbin interferují a vytváří tak v zastíněné části špičky v intenzitě způsobené interferencí.

Jiný příklad interference světla je na tenké, polopropustné vrstvě. Světlo dopadající na vrstvu se částečně odrazí od prvního rozhraní a částečně lomem projde skrz. Následně se



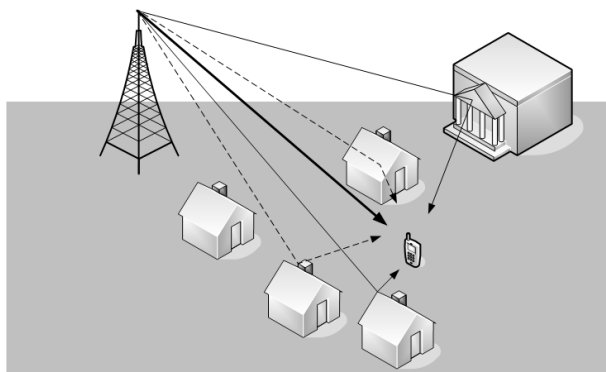
Obrázek 11: Difrakce na malé štěrbině, Zdroj: Wikipedia

buďto odrazí od druhého rozhraní vrstvy zpět odkud vlnění přišlo, nebo projde dál. Mezi přímo odraženým světlem a světlem odraženým od druhého rozhraní je dráhový rozdíl a tím i fázový posun. Tyto vlny mezi sebou interferují a část vlnových délek bílého světla se interferencí potlačeno, část zesíleno. Na povrchu je poté možné pozorovat různé barvy, dle úhlu pohledu, tloušťky vrstvy atd. Tento efekt lze pozorovat například na mýdlové bublině nebo na tenké vrstvě oleje na vodní hladině.

Většina modelů pro počítačovou grafiku využívá geometrickou optiku [2], která na rozdíl od vlnové optiky nevysvětluje jevy jako interference a ani se neuvažuje fázi vlnění. Interferenci tak není možné simulovat a lze říct, že k ní beztak dochází pouze v poměrně speciálních případech a proto není z hlediska počítačové grafiky tak zajímavá. Díky tomu není nutné simulovat vlnové vlastnosti světla, jako je fáze, polarizace apod. a stačí používat skalární veličiny jako radiance.

U rádiového signálu je interference velice důležitý jev, protože se projevuje při vícecestném šíření vlnění. Pokud vlnění do přijímací antény dorazí z více různých drah, například přímo z vysílací antény a druhé s jedním odrazem o překážku, je mezi nimi dráhový rozdíl, tedy i fázový posun. Tím spolu vlnění interferují a v závislosti na velikosti fázového posuvu může dojít až k vyrušení vlnění mezi sebou. K vícecestnému šíření dochází téměř vždy, kromě odrazu od překážek jej způsobuje například i odraz od různých vrstev atmosféry a difrakce.

Intenzitu paprsku v raytracigu rádiových vln proto nestačí vyjádřit skalárně jako u světla, ale je nutné zahrnout jeho vlnovou povahu, zejména fázi. Skutečnou intenzitou vlnění je totiž vektor, který se mění s postupujícím vlněním dle jeho frekvence, polarizace atd. To samozřejmě platí i u světla, ale lidské oko na rozdíl od antény není citlivé na



Obrázek 12: Vícecestné šíření signálu, Zdroj: [1]

konkrétní fázi nebo polarizaci přijatého vlnění, ale jen na jeho amplitudu.

Simulovat vlnový charakter vlnění pro raytracing, znamená definovat pro paprsek funkci, která vyjadřuje vektor intenzity pro každý bod prostoru, kterým paprsek prochází. Tato funkce by závisela na délce paprsku (respektive fázi), charakteru vlnění, vlnové délce, médiu ve kterém se paprsek šíří a podobně. Pokud se ale omezíme na harmonické vlnění a zanedbáme polarizaci, která se stejně obtížně simuluje, stačí pro vyjádření intenzity fázory. Fázor je komplexní číslo, které umožňuje jednoduše reprezentovat harmonické vlnění. Součet dvou fázorů dvou paprsků reprezentuje interferenci vlnění. Díky tomu lze příspěvky jednotlivých paprsků v přijímacích anténě sečíst ve tvaru fázorů a z výsledného fázoru poté lze vypočítat přijatou intenzitu paprsku.

5.7 Polarizace

Jak rádiové vlnění tak světlo je příčné vlnění. Příčné vlnění kmitá v rovině kolmé na směr šíření. Směr kterým v této rovině kmitá intenzita elektrického pole \vec{E} definuje polarizace. Obecně lze mluvit o eliptické polarizaci. Speciální typy polarizace jsou lineární a kruhová.

Lineární polarizace osciluje v jedné rovině kolmé na vlnoplochu. Lze hovořit například o vertikální nebo horizontální lineární polarizaci podle vztahu této roviny k zemskému povrchu. Obecně ale může vektor intenzity, kolmý na směr šíření vlnění, měnit svůj směr a velikost různě. To lze popsat jako superpozici dvou na sebe kolmých lineárně polarizovaných vln s různou intenzitou a fázovým posuvem. Součet těchto dvou vlnění v bodě opisuje obecně elipsu. U té je významným parametrem poměr jejích poloos, tomu se říká osový poměr (axial ratio). Lineární i kruhová polarizace je proto speciálním případem eliptické

polarizace. Lineární polarizace má fázový posun dvou na sebe kolmých vlnění 0 nebo 180 stupňů a poměr intenzit udává sklon lineární polarizace. Kruhová polarizace je případ, kdy si jsou velikosti poloos elipsy rovny (tedy je to kruh) a fázový posun je $+\pi/2$ nebo $-\pi/2$. Lze také hovořit o levotočivé nebo pravotočivé kruhové polarizaci dle orientace rotace ve směru šíření vlnění.

Světelné záření může být nekoherentní, to znamená nemá společnou osu vyzařování, případně ani frekvenci. To nastává, když je vlnění produkováno několika nezávislými zdroji. I nekoherentní vlnění ale statisticky často vykazuje částečnou polarizaci - tu lze vyjádřit jako superpozici nepolarizovaného a polarizovaného záření.

Na polarizaci má vliv odraz a lom. Po lomu nebo odrazu se polarizace mění v závislosti na vlastnostech materiálů, vlnové délce, úhlu dopadu apod.

Polarizace světla se využívá např. v LCD monitorech, ale samotné lidské oko na ni není citlivé. Běžné zdroje světla nejsou polarizované (jsou zdrojem nekoherentního vlnění). Z těchto důvodů není polarizace důležitým jevem pro počítačovou grafiku a proto ji není třeba simulovat v raytracingu.

U rádiových vln je naopak polarizace velice důležitým jevem. Vysílací antény jsou zdrojem koherentního záření s určitou polarizací (lineární nebo kruhová). Zisk přijímací antény je také závislý na polarizaci přijímaného vlnění. To je zejména patrné u lineární polarizace. Pokud by jak vysílací tak přijímací anténa používá lineární polarizaci a jejich úhel oproti sobě je 90 stupňů, zisk bude teoreticky nulový. Prakticky díky vícecestnému šíření, rozptylu apod. nulový nebude, ale bude výrazně nižší než při ideální orientaci antén. U kruhové polarizace je zase anténa obvykle citlivá buď na levotočivou nebo pravotočivou kruhovou polarizaci. Toho se využívá např. pro eliminaci vícecestného šíření signálu, kdy po odrazu se levotočivá kruhová polarizace mění na pravotočivou a naopak. Protože anténa je citlivá pouze na jeden směr, je odražený paprsek s druhým směrem kruhového vlnění přijat s malým ziskem.

V radiotechnice se také používá polarizační diverzita. Ta spočívá v tom, že jsou použity dvě antény pro lineární polarizaci od sebe natočené o 90 stupňů (často integrovány v jedné anténě). Nemůže tak dojít k útlumu způsobeného špatnou polarizací protože ať je polarizace signálu jakákoliv, bude alespoň jedna z antén orientována v přijatelné pozici. To je důležité zejména pro mobilní sítě, kde orientace přijímačů může být jakákoliv.

Polarizaci lze využít rovněž k polarizačnímu oddělení kanálů. U pevného spoje lze na jednu frekvenci modulovat dva různé signály, stačí jak vysílací, tak přijímací antény s

lineární polarizací a otočit je od sebe o 90 stupňů. Obě vlnění lze takto oddělit a zvýšit tak třeba datovou propustnost.

Aby raytracing mohl simulovat polarizaci, znamená to zkomplikování údajů, které se ukládají u paprsků. Nestací skalární číslo evidující intenzitu, ani fázor, ale je třeba evidovat např. superpozici dvou lineárně polarizovaných vlnění, případně i nekoherentní složku vlnění. Pro získání intenzity v určitém místě je třeba pracovat s vektory určené polarizací a fází v daném místě. Zároveň je samozřejmě nutné při odrazu a lomu počítat navíc polarizaci odraženého paprsku, protože polarizace se odrazem nebo lomem mění.

V praxi se tyto jevy při raytracingu často nesimulují. Významně by to komplikovalo implementaci i složitost. Pro určení vlivu polarizace se využívají jiné modely.

6 Srovnání raytracingu

V předchozí kapitole byly popsány a srovnány jednotlivé jevy při šíření vlnění a světla, včetně jejich vlivu na raytracing. V této kapitole budou srovnávány rozdíly raytracingu v obou odvětvích, a to jak z hlediska jejich účelu, implementace i výpočetní náročnosti.

6.1 Terminologie

Jak v počítačové grafice tak i radiotechnice se používají termíny ray tracing, ray casting a ray launching. Jejich význam je však poněkud odlišný.

Termín raytracing v grafice označuje globální zobrazovací metodu. Konkrétně jde o metodu vycházející od pozorovatele, která vystřeluje paprsky z kamery z každého pixelu. Ve scéně je nalezen nejbližší průsečík a následně jsou vyslány až další tři typy paprsků - odrazový, lomový a do světelných zdrojů. Odrazový simuluje spekulární (zrcadlový) odraz, lomový simuluje průsvitný materiál, a paprsky do světelných zdrojů slouží k určení zda je paprsek zastíněn jiným objektem. Existuje mnoho variant tohoto algoritmu, které jej různým způsobem rozšiřují. Rovněž existuje mnoho dalších algoritmů, pro řešení zobrazovací rovnice, které používají paprsky a geometrickou optiku, ale používají jiný koncept řešení, jinak vysílají paprsky, které jinak interagují s prostředím a podobně. Tyto algoritmy se někdy také označují jako raytracingové algoritmy. Obecně lze tedy říci, že různé algoritmy založené na sledování paprsku se někdy také označují jako raytracing. Tato terminologie není tedy úplně jednoznačná.

Ray casting v počítačové grafice označuje zjednodušenou formu raytracingu, která používá předpoklad, že pokud plocha objektu není odvrácena od světelného zdroje, je tímto světelným zdrojem osvětlena. Neuvažuje tedy stínění objektů mezi sebou. Jinak je ray casting obdobný raytracingu, vystřeluje paprsky z pixelů kamery, hledá jejich nejbližší průsečíky ve scéně, ale nevysílá paprsky do zdrojů světla a předpokládá, že plocha je vždy osvětlena, pokud není od světla odvrácena.

Ray Tracingem se pro simulaci šíření vlnění označují metody, které analyticky hledají všechny paprsky mezi vysílací a přijímací anténou.

Ray Launching je metoda, která vystřeluje paprsky z vysílací antény. Paprsky mají počátek ve vysílací anténě a jsou vystřelovány tak, aby pokryly celou vysílací charakteristiku antény, například v pravidelné úhlové separaci. Paprsky se poté šíří scénou, kde

podléhají odrazům, průchodům objekty a difrakci. Po dopadu do přijímací antény se započte jejich příspěvek.

6.2 Srovnání

V předchozí kapitole byly porovnány jednotlivé jevy při šíření obou typů vlnění a jejich vliv na raytracing. Zbývá tedy ještě srovnat oba raytracinky z širšího hlediska.

V první řadě je třeba srovnat účel a výstupy raytracingu z obou oborů. V grafice jde o metodu řešení globálního zobrazování. To znamená, že vytváří 2D obraz ve formě rastru z 3D scény, podobně jako by jej zachytila kamera. Paprsky vystřelované z kamery budou převedeny na barvu pixelu v obrazu. Snahou je, aby vytvářený obraz odpovídal skutečnému vjemu lidským okem. Vstupem raytracingu je typicky 3D scéna, její objekty a materiály, světelné zdroje včetně jejich umístění a charakteristice vyzařovaného světla a v neposlední řadě umístění kamery a její parametry. Výstup je 2D rastrový obrázek.

V radiotechnice je cílem raytracingu simulovat šíření vlnění ve scéně. Vstupem je scéna, umístění vysílací antény a její vysílací charakteristika. Dalšími vstupními parametry mohou být umístění přijímacích antén a jejich charakteristiky, materiály ve scéně a jejich vlastnosti, vlnová délka simulovaného vlnění a podobně. Výstupem může být intenzita signálu pro každý bod ve scéně, nebo jen pro jeden či více konkrétních bodů, kde jsou přijímací antény. Dalšími výstupy mohou být také další parametry rádiového spoje, jako například impulsní odezva pro popis vícecestného šíření vlny.

Z dvou druhů algoritmů raytracingu pro vlnění z kapitoly 6.1 je srovnatelný s počítačovou grafikou spíše ray launching, protože paprsky v grafice jsou většinou vystřelovány z kamery nebo zdroje světla, analytické hledání cest paprsků není tak obvyklé. Z dvou uvedených algoritmů počítačové grafiky je ray launching vlnění srovnatelný spíše s grafickým raytracingem, přestože dle názvu by se mohlo zdát, že s ray castingem. Avšak konceptuálně ray launching vlnění spíše o metoda vycházející ze zdroje světla než od pozorovatele, protože paprsky jsou vystřelovány z vysílací antény. Ta je jakási obdoba světelného zdroje, alespoň z hlediska raytracingu. Aby srovnání bylo konkrétní, dále budou probírány rozdíly klasického grafického raytracingu a ray launchingu vlnění.

V klasickém grafickém raytracingu je směr paprsků opačný než je směr fotonů. V rádiovém signálu se směr paprsků uvažuje stejný jako směr šíření vlnění, protože není k tomuto otočení důvod. V grafice to dává smysl z hlediska složitosti výpočtu. Zdroje

světla vyšlou velké množství fotonů, respektive paprsků, do různých směrů, ale pouze zlomek je zachycen v kameře. U rádiového signálu je situace obdobná, ale takovéto otočení by nedávalo smysl, protože ničemu nepomůže. Stále je třeba najít cesty z jedné antény do druhé, jestli je výchozí anténou přijímací nebo vysílací nic nezmění, protože platí reciprocity.

Oba druhy sledování paprsků hledají průsečíky paprsků s objekty ve scéně. Mechanizmy vyhledávání průsečíků jsou v podstatě totožné. Algoritmy průsečíků paprsku s objekty (koule, trojúhelníky atd) jsou stejné. Akcelerační struktury pro zrychlení hledání průsečíků rovněž. Většina akceleračních technik používaných v grafice půjde aplikovat i pro rádiové vlny, například vystřelování paprsků po skupinách. V obou oborech bude platit, že vyhledávání průsečíků paprsků je výpočetně nejnáročnější částí simulace.

Oba raytracingy generují rozdílné sekundární paprsky po dopadu na objekt. V obou případech je vygenerován paprsek reprezentující lom vlnění pro průsvitné materiály. Rovněž je v obou případech vygenerován paprsek spekulárního odrazu. Rozdíl je, že grafický raytracing generuje paprsky do každého zdroje světla, pomocí kterých zjišťuje, zda je bod na objektu osvětlen daným zdrojem světla nebo je zastíněn jiným objektem. V raytracingu rádiového vlnění se paprsky do přijímací antény většinou negenerují a místo toho se zkoumá, zda přímo paprsek prochází přijímací anténou nebo ne. Díky tomu jsou simulovány čistě pouze spekulární odrazy. Složitější varianty ray launchingu můžou kromě spekulárního odrazu simulovat i difuzní odrazy, to funguje tak, že v místě dopadu je přístupováno jako k sekundárnímu zdroji vlnění a jsou vystřelovány paprsky do všech směrů. To samozřejmě značně komplikuje výpočetní složitost.

Kromě odrazu je u vlnění velice důležitý vliv difrakce. Možností jak tento jev simulovat v raytracingu je více. Paprsky lze generovat běžným způsobem, a pak detekovat zda dopadl na hranu. Lze rovněž explicitně najít hrany a vyslat speciální paprsky na hrany s určitým rozestupem. Po dopadu paprsku na hranu je ale postup v obou případech stejný. Bod se stává sekundárním zdrojem vlnění, tedy jsou vysílány další paprsky, podobně jako z vysílací antény. To samozřejmě podobně jako difuzní odrazy velice komplikuje výpočetní složitost.

Významné rozdíly jsou v údajích, které se evidují u paprsku. V grafice stačí skalární hodnoty, které reprezentují intenzitu světla, dle jednotlivých vlnových délek v celé délce paprsku. Spektrální raytracingy pracují přímo se skutečným spektrálním složením světla. Typičtější je ale použití barevného modelu, který z několika skalárními hodnotami aproximuje spektrální složení viditelného světla. Nejtýpčtější je model RGB, protože jej používají

monitory. Tomu stačí tři skalární hodnoty. Další parametry světla jako jeho polarizace, fáze nejsou v grafice zajímavé a tak je není třeba simulovat. U rádiového vlnění se většinou pracuje pouze s jednou frekvencí a proto není nutné evidovat spektrální složení, ale stačí jedna intenzita pro danou frekvenci. Pro rádiové vlnění je velice důležitá fáze. Pro zahrnutí vlivu fáze se používají fázory. Fázor je komplexní číslo, které může reprezentovat jak frekvenci, amplitudu tak i počáteční fázi vlnění paprsku. Z fázoru lze vyjádřit skalární hodnotu intenzity v určitém bodě na paprsku, avšak bez efektu polarizace. Polarizace je ale poměrně důležitá, a pokud ji chceme zahrnout, je nutné v konkrétním bodě pracovat s vektorem intenzity místo skalárním číslem. Pro paprsek je proto nutné popsat jak se tento vektor mění s fází vlnění. To je ale poměrně komplikované, proto se efekt polarizace většinou nesimuluje přímo v raytracingu, ale vypočítá se jiným modelem, například empirickým.

6.3 Srovnání výpočetní složitosti

Obecné srovnání složitosti raytracingu z obou oborů je poněkud ošemetné. Konkrétní složitost záleží na konkrétní implementaci a ta se může značně lišit. Pro představu tedy vezměme klasický algoritmus grafického raytracingu, který simuluje pouze bodové světla, pouze spekulární a lomové paprsky. Pro něj platí:

- Pro obraz s rozlišením n na n pixelů je třeba vyslat minimálně jeden paprsek pro každý pixel, to dělá $O(n^2)$.
- Pro každý paprsek (primární i sekundární) je třeba provést až $O(o)$ testů průsečíku s objektem, kde o je počet objektů ve scéně.
- V každém průsečíku je nutné udělat test zastínění pro každý zdroj světla, to znamená vyslat l dalších paprsků do každého světla a otestovat zastínění o objekty $O(lo)$.
- To dohromady na jeden paprsek znamená složitost $O(o + lo)$.
- Jestliže je bod dopadu zrcadlový a průhledný, jsou vyslány až dva další paprsky, každý z těchto paprsků může dopadnout opět na lesklý povrch a může se tak dál větvit. Je tedy nutné definovat maximální hloubku rekurze k . To v nejhorším případě znamená $2^{k+1} - 1$ paprsků.

To dohromady znamená složitost:

$$O(n^2 * (o + lo) * 2^{k+1} - 1) = O(n^2 lo 2^k) \quad (25)$$

To znamená, že složitost roste se kvadraticky se zvyšujícím se rozlišením. Se zvyšujícím se počtem světelných objektů roste lineárně. Se zvyšující se hloubkou rekurze dokonce exponenciálně.

V praxi je však skutečná složitost poměrně vzdálená té asymptotické. Vliv rozlišení je poměrně přesný, ale akcelerační struktury dokáží redukovat průměrný počet intersekčních testů pro každý paprsek (viz dále). Stejně tak pokud nejsou všechny objekty ve scéně lesklé a průsvitné, dojde jen k několika málo odrazům a lomům a poté se rekurze zastaví.

Pro raytracing rádiového vlnění, který simuluje pouze spekulární odrazy, lomy a omezený počet difrakcí by platilo:

- Z vysílací antény se vyšle n paprsků v pravidelné úhlové separaci pokrývající celou vyzářovací charakteristiku antény: $O(n)$.
- Každý paprsek se může k krát odrazit, a k krát projít lomem do materiálu (k je limit rekurze). To znamená že se každý primární paprsek může rozvětvit až na $O(2^k)$ sekundárních.
- Každý z vyslaných paprsků může na své cestě maximálně d krát projít difrakcí. Bod difrakce (na hraně objektu) se stane sekundárním zdrojem vlnění a vyšle se z něj n sekundárních paprsků do různých směrů. To pro d difrakcí znamená n^d paprsků.
- Pro každý paprsek je třeba najít průsečík s o objekty: $O(o)$.
- U každého paprsku se musí udělat test zda byl přijat přijímací anténou: $O(1)$.

To znamená celkovou složitost:

$$O(n * 2^k * n^d * o) \tag{26}$$

Počet vyslaných paprsků se volí a ovlivňuje přesnost výpočtu. Ukázková aplikace simuluje řádově desítky milionů paprsků, aby výpočet byl rozumně přesný. Protože n je poměrně velké číslo, počet difrakcí má obrovský vliv na výslednou složitost. Sice jen část paprsků dopadne na hranu, aby podstoupila difrakci, ale i tak se v praxi simuluje maximálně jedna či dvě difrakce. Pro počet objektů platí to samé jako v grafice, tj. že jeho vliv na délku výpočtu lze výrazně redukovat akcelerační strukturou.

Závěrem je nutné říci, že se v raytracingu používá mnoho technik pro jeho zrychlení, z nichž některé nemají vliv na asymptotickou složitost. Příkladem je již zmíněná akcelerační

struktura nebo simulování paprsků po skupinách. Akcelerační struktura redukuje počet intersekčních testů paprsku s objekty v průměru z lineární na logaritmickou složitost, ale stojí něco sestavit (například $O(n \log n)$ pro k-d strom). Simulace paprsků po skupinách nemá žádný vliv na složitost, ale pokud jsou paprsky dobře distribuované (souběžné), redukuje nutný počet výpočtů tím, že je provede jednou pro několik paprsků najednou. Složitost tedy není zcela vypovídající o rychlosti výpočtu, ta velmi závisí na optimalizaci daného algoritmu.

7 Demonstrační aplikace

Součástí zadání této práce je vytvoření demonstračního softwarového nástroje pro 3D simulaci šíření rádiových vln ve složitém prostředí reálného terénu. Účelem tohoto softwaru bude vyzkoušet některé srovnání raytracingu obou oborů v praxi. Software bude vytvořený metodami, které se používají v grafice a tak se zároveň ukáže, zda jsou tyto metody vhodné i pro rádiové vlny. Kromě toho bude software sloužit i jako výukový nástroj, který umožní snadno demonstrovat některé jevy při šíření vlny velice názorně. Software by měl vizuálně zobrazit scénu a paprsky rozhodné pro šíření vlny. Dále bude generovat grafy impulsní odezvy a relativní úrovně intenzity signálu.

Program bude určen pro volný terén. Jeho vstupem pro popis terénu bude výšková mapa. Díky tomu bude zaměřen spíše na spoje v krajině, než do zástavby nebo uvnitř budov. Běžné řešení takového dálkového spoje spočívá v tom, že se vezme 2D průřez terénu mezi vysílací a přijímací anténou a v něm se najdou případné odrazy a difrakce. Ve skutečné krajině se však vlna šíří 3D prostorem, a tak je možné, že dojde k odrazu od terénní nerovnosti, která je mimo tento 2D průřez. To zmíněné tradiční řešení nedokáže simulovat a je nutné taková místa najít jinými způsoby, třeba právě raytracingem.

Vstupem programu je popis scény v podobě výškové mapy, poloha vysílací antény a její směrová charakteristika, polohy přijímacích antén a simulovaná vlnová délka vlny. Kromě toho bude třeba zadat některé parametry simulace, jako například počet simulovaných paprsků a podobně. Přijímací antény budou vždy umístěny na úsečce a program bude vzorkovat různé umístění antény na této úsečce.

Výstup z programu bude v první řadě vizualizovaná scéna ve 3D, ve které se bude možné pohybovat a prohlédnout si situaci. Ve scéně bude zobrazena vysílací a přijímací anténa, případně i šířka svazku vysílající antény. Kromě toho ve scéně budou viditelné paprsky, zajímavé pro šíření vlny. Vizualizace bude rovněž umožňovat přepínat mezi různými přijímacími anténami a zobrazovat paprsky, které dorazí do konkrétního umístění antény.

Kromě vizualizace samotné budou výstupem programu dva různé grafy. První bude impulsní odezva pro jednu z přijímacích antén. Druhým grafem bude intenzita vlnění pro různé pozice antény vypočtena třemi různými způsoby. Proto budou přijímací antény vždy umístěny na úsečce. V grafu se zobrazí poměrná intenzita pro každou pozici antény dle nastaveného vzorkování na této úsečce.

Účelem vizualizace je zvýraznit oblasti ve scéně, které jsou zajímavé pro šíření signálu,

tedy kde dochází k odrazu. V kombinaci s oběma grafy tak bude názorně viditelné jak jednotlivé grafy vznikly, proč vypadají tak jak vypadají a podobně. Například ve scéně budou viditelné různé cesty paprsků s různými odrazy. To bude korespondovat s impulsní odezvou, protože v ní budou viditelné impulsy pro každý z odrazů včetně jejich zpoždění, útlumu a podobně.

Účelem aplikace a zejména grafů není dokonale přesná simulace. To ostatně ani není možné, zejména bez zahrnutí efektu difrakce. Rovněž by bylo třeba využít složitějších modelů šíření, výsledky ověřovat a případně kalibrovat testovacím měřením a podobně. Simulované jevy budou výrazně zjednodušeny nebo idealizovány. Protože je aplikace zaměřena jako demonstrační, není to na škodu. Díky idealizaci a izolování od dalších vlivů budou jednotlivé jevy v grafech dobře zřetelné a snadno rozlišitelné.

7.1 Řešení

Tato podkapitola popisuje zvolené řešení a algoritmy. Budou rozebrány důvody k volbě jednotlivých řešení a algoritmů a jejich případný vliv na aplikaci.

7.1.1 Raytracing

Stěžejní částí aplikace bude raytracing. V radiotechnice se používají dva druhy raytracingu: ray launching a ray tracing. Rozdíl mezi nimi je popsán v kapitole 6.1. V této aplikaci bude úkolem sledování paprsků najít všechny cesty z vysílací do přijímacích antén. Ray tracing, tak jak jej chápe radiotechnika, je vhodný spíše pro vyhledávání cesty přes paprsky mezi dvěma body. Tato aplikace bude simulaci provádět pro několik přijímacích antén najednou, což by znamenalo pro každou anténu provádět víceméně celý ray tracing znovu. Přitom jde o výpočetně velice náročnou operaci. Z tohoto hlediska bude vhodnější ray launching. Dalším důvodem pro volbu ray launchingu je, že aplikace má používat algoritmy používané v počítačové grafice. Většina paprskových algoritmů v grafice, včetně klasického raytracingu, přitom odpovídá spíše vystřelování paprsků, nežli analytickému hledání cesty mezi dvěma body. Paprsky jsou v grafice vystřelovány z kamery, zdroje světla atd. Jejich cesta je dále sledována do zdrojů světla, do kamery atd. Úloha, kdy by se hledaly cesty paprsků mezi dvěma body není pro grafiku typická a proto v grafice paprskové algoritmy odpovídají spíše ray launchingu.

Algoritmus tedy bude vystřelovat paprsky z vysílací antény. Počet vyslaných paprsků

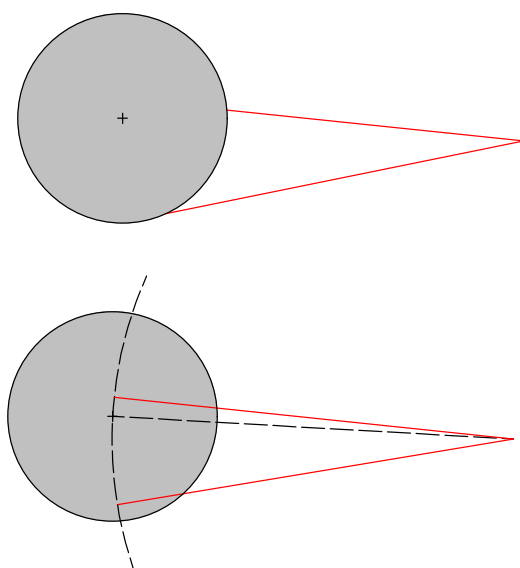
bude předem definovaný jako parametr simulace. Simulovaná anténa bude směrová, to znamená, že svazek vysílaných paprsků lze omezit určitým úhlem, ve kterém vysílací charakteristika antény vysílá s nezanedbatelnou intenzitou. Tento úhel, společně s orientací a pozicí antény, bude vstupním parametrem simulace. Byl zvolen algoritmus, který generuje definovaný počet paprsků náhodně. Pro správnou simulaci je nutné zajistit, aby paprsky byly uniformně rozděleny a byl jich dostatečný počet pro rovnoměrné pokrytí scény. Alternativou pro náhodné generování paprsků by bylo generovat je pravidelně s určitou úhlovou separací. To je samozřejmě také možné, ale byl zvolen tento náhodný způsob, protože podobné techniky náhodného generování paprsků jsou často používány v grafice (například v path traceru), a aplikace má používat techniky používané v grafice. Konkrétně algoritmus funguje tak, že vygeneruje náhodný paprsek s určitým maximálním úhlem v lokálním souřadném systému a ten následně transformuje podle směru natočení vysílací antény rotační maticí. Generování paprsku v lokálním souřadném systému spočívá ve vygenerování náhodných souřadnic v kruhu (uniformně rozdělených), ze kterých se následně vypočítá směr paprsku. Při zajištění uniformního rozdělení bodů na kruhu budou uniformně rozdělené i vygenerované paprsky.

Po vyslání z antény algoritmus sleduje paprsky ve scéně. Hledá tradičním způsobem první průsečík objektu se scénou, konkrétně s výškovou mapou a přijímacími anténami. Přijímací anténa je reprezentována nenulovým objemem, konkrétně koulí s definovaným průměrem ze dvou důvodů. Ve skutečnosti má anténa také určitou plochu, která přijímá vlnění. Druhý důvod je, že objem koule slouží pro kompenzaci nepřesností ve výškové mapě způsobené jejím nepřesným popisem scény a zavádí tak jistou toleranci, kdy je paprsek považován za přijatý anténou.

Tradiční algoritmus průsečíku koule s paprskem hledá průsečík na povrchu koule. Díky tomu se bude lišit délka paprsku vyslaného ze stejného místa podle toho, kam na povrch koule paprsek dopadne a společně s délkou paprsku se bude lišit fáze přijaté vlny (viz obrázek 13). Proto by poloměr této koule měl být výrazně menší, než je vlnová délka simulovaného signálu, aby rozdíl přijatých fází byl malý. Vzhledem k tomu, že program cílí mimo jiné na mobilní služby, kde je typická frekvence např. kolem 900MHz a vlnová délka tedy kolem 33cm, by to znamenalo průměr přijímací koule v řádu jednotek centimetrů. Když vezmeme v potaz spoj na vzdálenost řádově kilometrů, je to poměrně malá plocha a pouze velice malý zlomek vysílaných paprsků by ji zasáhl, takže by nezbývalo než simulovat velké množství paprsků.

Byla proto navržena úprava algoritmu průsečíku, díky které velikost přijímací koule

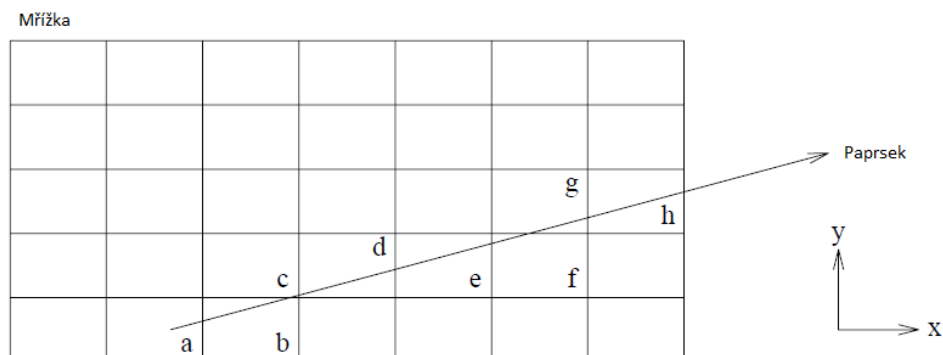
nemá vliv na přijatou fázi vlny. Ta je implementována modifikací tradičního algoritmu průsečíku koule s paprskem. Upravený algoritmus rozhodne, zda došlo k průsečíku stejným způsobem, ale výsledná délka paprsku je rovna vzdálenosti z počátku paprsku do středu koule. Díky tomu všechny paprsky se stejným počátkem budou mít v případě přijetí stejnou délku a tedy stejnou fázi, nezávisle na tom do jakého místa koule dopadnou. Upravený algoritmus ilustruje obrázek 13, paprsky jsou vyznačeny červeně. Z obrázku je zřejmé, že délka paprsků u standardního algoritmu se liší, kdežto u druhé varianty jsou vždy stejně dlouhé.



Obrázek 13: Standardní algoritmus průsečíku (nahore), upravený algoritmus průsečíku (dole)

Kromě průsečíků s přijímací anténou algoritmus hledá průsečíky s výškovou mapou. V aplikaci je implementována modifikace algoritmu z [8]. Jde o variantu DDA algoritmu (Digital differential analyzer), který na rozdíl od jiných DDA algoritmu traverzuje přesně ty buňky, kudy prochází paprsek, viz obrázek 14. Navštívit všechny buňky je nezbytné pro korektní výsledek. Nevýhoda zvoleného algoritmu je, že na rozdíl například od Bresenhamova algoritmu používá aritmetiku s plovoucí řádovou čárkou. Existují i modifikace Bresenhamova algoritmu, které traverzují navíc i sousední buňky, aby neminuly žádné místo potenciálního průsečíku, ale testují více buněk, než je nezbytné. Díky tomu jakékoliv zrychlení z použití rychlejšího Bresenhamova algoritmu bude negováno více náročnými testy průsečíku. Další nevýhodou zvoleného algoritmu je potenciální agregace chyb při

traverzaci. To se ale v testování neukázalo jako problém pro testované scény.



Obrázek 14: Buňky traverzované DDA algoritmem, Zdroj: [8]

Oproti implementaci algoritmu z [8] bylo implementováno několik úprav a zrychlení, zejména heuristika, která redukuje nutný počet náročných testů průsečíku testem obálky v ose Z. Heuristika eviduje maximální výšku v buňce výškové mapy a zároveň vypočítá minimální výšku paprsku pro každou buňku. V případě, že k průsečíku nemůže dojít, přeskočí jeho test.

Samotný test průsečíku paprsku s buňkou je implementován jako hledání průsečíku paprsku s dvěma trojúhelníky, které reprezentují buňku výškové mapy. To samozřejmě není ideální a vzniká při tom určitá chyba v místě odrazu paprsku. Problém ilustruje obrázek 15. Jde o situaci převedenou do 2D a ilustruje rozdíl odraženého paprsku mezi výškovou mapou interpolovanou lineárně a skutečnou výškou v daném bodě.

Směr odrazu určuje normála a ta je interpolována lineárně po složkách. Směr odrazu se tak mění plynule s tím jak se interpoluje normála. Interpolované normály ve scéně ukazuje obrázek 16. Interpolace normál je nezbytná, kdyby byly používány pouze normály vzorkované výškovou mapou, byly by možné úhly odrazu velice omezené. Díky tomu by nemuselo dojít k odrazu, který vede do přijímací antény

Z obrázku 15 je zřejmé, že při výpočtu odrazu zvolenými metodami dochází jednak k posuvu místa odrazu paprsku a rovněž ke změně jeho délky. Posun bodu odrazu není problém, protože jej kompenzuje tolerance větší přijímací antény. Změna délky paprsku má vliv na přijatou fázi která má vliv na výsledné grafy. Tyto chyby výpočtu nelze úplně odstranit, protože je vždy nutné zvolit určitou interpolaci výškové mapy a ta vždy pouze odhaduje hodnotu ze sousedních hodnot, které jsou vzorkovány s konečným rozlišením.



Obrázek 15: Nepřesnost hledání pozice průsečíku

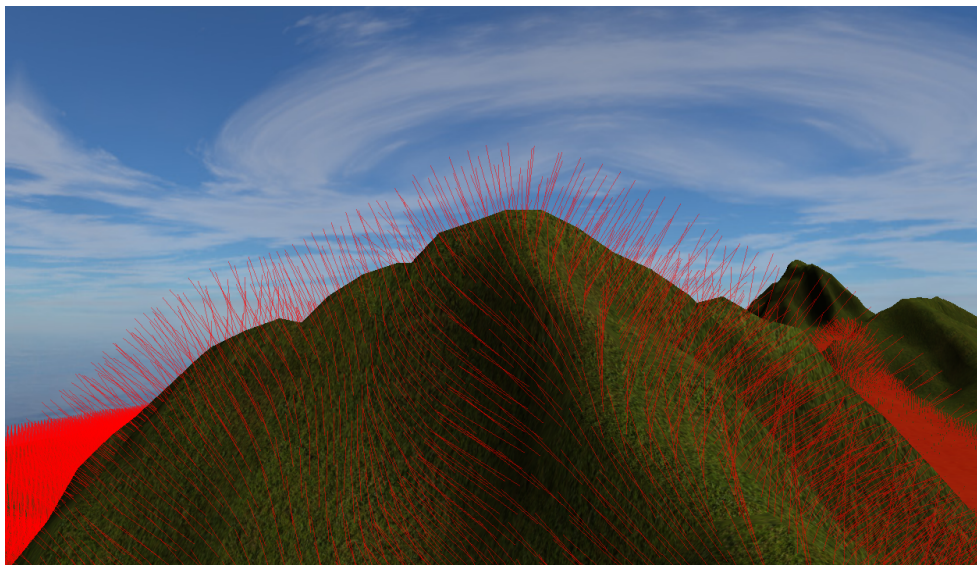
Interpolace byly pro program zvoleny tak jak bylo popsáno, jejich chyby jsou rozebrány a neměly by mít zásadní vliv na přesnost výpočtu, jistě by bylo možné pro určité případy zvolit lepší interpolace a algoritmy průsečíku, ale pro účely a přesnost této aplikace je zvolený způsob více než dostatečný.

Raytracing hledá paprsky, které dorazí do jedné z přijímacích antén. Protože jich může být mnoho (řádově stovky), samotná traverzace se provádí pouze jednou a pro každý paprsek se kontroluje, zda byl přijat některou z přijímacích antén. Pokud byl přijat, je paprsek uložen pro následné výpočty a vizualizaci. Díky pouze jedné traverzaci, pro všechny antény, se značně zrychlí čas výpočtu, přesto je kontrola průsečíku se stovkami antén značným zpomalením.

7.2 Vizualizace

Součástí aplikace je vizualizace, ta slouží jednak k zobrazení samotné scény, umístění antén, ale i k zobrazení výsledků raytracingu. Uživatel se může ve scéně volně pohybovat prohlédnout si všechny části scény, zejména kde dochází k odrazům a podobně. Vizualizace realizuje API OpenGL.

Scéna je reprezentována výškovou mapou, ta je načtena z obrázku ve stupních šedi, kde

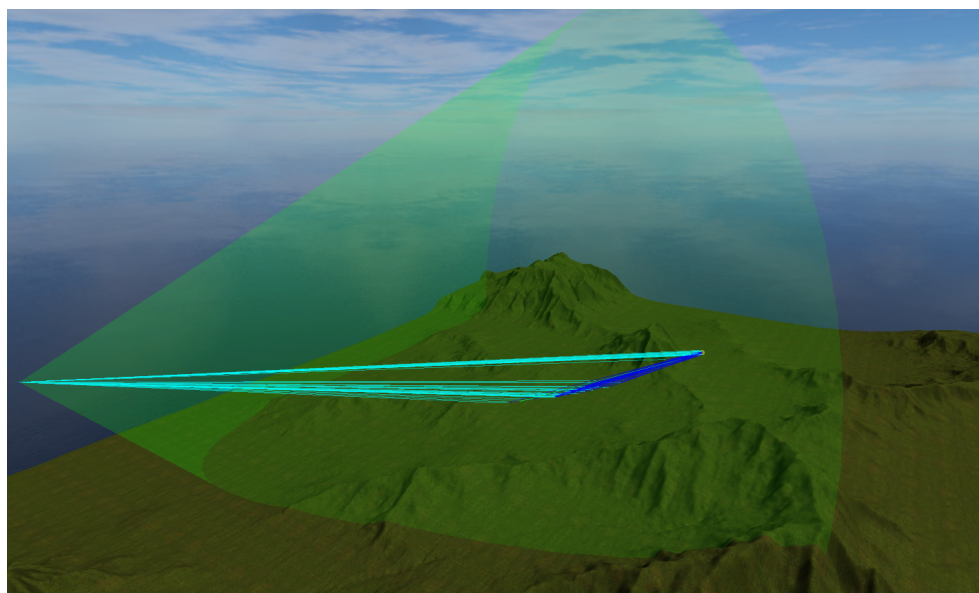


Obrázek 16: Interpolované normály

čím světlejší barva, tím výše umístěné je místo. Z obrázku se získá 2D pole s výškami a z něj se vypočtou normály a další pomocné hodnoty. Výšková mapa je pro zobrazení triangulována do indexované geometrie. S tím souvisí poměrně nepříjemné omezení OpenGL, že pro indexaci používá 16 bitové hodnoty. Ty dokáží adresovat 65536 hodnot, což vystačí pouze na výškovou mapu o rozměrech 256x256. To je pro větší scénu poměrně málo, proto jsou větší výškové mapy rozděleny na menší, s maximální velikostí 256x256. Tyto rozdělené výškové mapy jsou zobrazeny každá zvlášť, jako separátní geometrie. Geometrie je vykreslována s Phongovo osvětlovacím modelem, aby byly dobře vidět veškeré terénní nerovnosti.

Paprsky jsou vizualizovány jako čáry s různou barvou. Vzhledem k tomu, že paprsků může být poměrně velké množství, je nutné je do OpenGL a potažmo na grafickou kartu poslat najednou. Posílání paprsků po jednom má obrovský overhead, který extrémně zpomaluje vizualizaci.

Vysílací anténa a její charakteristika je vizualizována pomocí poloprůhledného kuželu. Příjemací anténa v podobě poloprůhledné koule. Vizualizace zobrazuje situaci pro jednotlivé příjemací antény postupně s pomocí animace. Animace přepíná mezi jednotlivými příjemacími anténami a vždy se zobrazují pouze paprsky přijaté touto anténou. Díky tomu je dobře vidět efekt umístění antény na přijaté paprsky. Například lze pozorovat, že v nějaké pozici dochází k nežádoucímu odrazu, ale při posunutí antény o kus vedle již ne.



Obrázek 17: Příklad vizualizované scény

7.3 Grafy

Dalším výstupy z aplikace jsou grafy popisující rádiový spoj. Konkrétně impulsní odezva a poměrná intenzita signálu.

Impulsní odezva popisuje jaký průběh signálu bude přijatý přijímací anténou, pokud bude z vysílací antény vyslán krátký impuls. V ideálním případě by impuls vyslaný z vysílací antény, byl zachycen přijímací anténou v nezměněné podobě. Takhle to však díky různým vlivům v praxi nefunguje, zejména kvůli vícecestnému šíření vlny. Vlna totiž putuje konečnou rychlostí a tak pokud několika různými cestami s různou délkou dojde do přijímací antény, puls bude zachycen několikrát s různým zpožděním. Impulsní odezva se proto hodí pro popis tohoto jevu.

V praxi je impulsní odezva vždy spojitá funkce, demonstrační aplikace poskytuje pouze diskrétní podobu. Odezva je tam tak určitým způsobem idealizovaná, pulsy mají nulovou délku, zobrazuje přesné zpoždění s kterým puls skrz různé cesty dorazí do antény a zároveň útlum těchto cest. Program zobrazuje odezvu vždy pouze pro jednu anténu. Příklad výstupu impulsní odezvy je v obrázku 18. V obrázku jsou vidět impulsy pro různé cesty paprsku a zpoždění, se kterým dorazily v ose Y. V ose X je intenzita se kterou daný impuls dorazil. Ta se snižuje se vzdáleností, kterou musí vlna urazit (díky ztrátám šířením) a s

každým odrazem, kde se část energie pohltí, rozptýlí atd. V obrázku je vidět, že některé impulsy jsou silnější čarou, to je způsobeno odrazem od větší plochy, kdy do antény dorazilo více paprsků s drobnými rozdíly zpoždění.

Druhým grafem, který demonstrační aplikace generuje, je poměrná úroveň intenzity v přijímací anténě. Ta vyjadřuje intenzitu elektromagnetického pole v přijímací anténě, v poměru k intenzitě vyslané vysílací anténou. Nereprezentuje konkrétní výkonovou úroveň, ale pouze intenzitu v poměru k počáteční intenzitě vyslané z vysílací antény. Dobře tak vyjadřuje ztráty při přenosu. Na intenzitu mají vliv jevy, jako ztráty šířením, ztráta energie vlny při odrazu a podobně. Tento graf by měl pomoci například s vybráním nejvhodnějšího umístění antény. Rovněž v něm lze dobře pozorovat vliv vícecestného šíření. Pokud se bere v potaz fáze přijaté vlny (viz dále E_1), intenzita osciluje společně s tím, jak se pohybuje anténa. To je dáno fázovým součtem intenzit každého paprsku. S tím, jak se mění pozice antény, se mění i délka jednotlivých cest vln a společně s ní přijatá fáze. V určitých pozicích antény se vlny, respektive paprsky, sčítají se stejnou amplitudou, v jiných s opačnou. Pokud se sečtou s opačnou, je příspěvek intenzity dvou vln částečně vyrušen interferencí. To způsobuje zmíněnou oscilaci intenzity E_1 .

Program generuje tři různé hodnoty intenzit s různými způsoby výpočtu. E_1 je intenzita včetně vlivu fáze. E_2 je intenzita bez vlivu fáze – všechny intenzity paprsků jsou sečteny, jako by měly stejnou, tj. maximální amplitudu. E_3 je střední hodnota E_2 , vypočtena pomocí průměru klouzavým oknem. E_1 a E_2 se vypočte sečtením intenzit všech paprsků, které dorazily do přijímací antény. U E_1 jde o součet fázorů, u E_2 jde o skalární součet. Příspěvek jednoho paprsku lze vyjádřit jako:

$$E_{p1} = |E_0| e^{j\lambda_0} \frac{1}{d} \prod_i (R_i) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d} \quad (27)$$

$$E_{p2} = |E_0| e^{j\lambda_0} \frac{1}{d} \prod_i (R_i) 1 \quad (28)$$

V obou případech člen $|E_0|$ [V/m] vyjadřuje počáteční intenzitu, $e^{j\lambda_0}$ je fázor, který vyjadřuje počáteční fázi vlny. Vzhledem k tomu, že grafy zobrazují poměrnou intenzitu, lze za $|E_0|$ dosadit 1. Počáteční fázor vlny je pro účely této aplikace taky nezajímavý a lze nahradit 1. $\frac{1}{d}$ aproximuje ztráty šířením, d [m] je celková délka všech paprsků na cestě. R_i je koeficient i -tého odrazu, $e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d}$ je fázor vlny.

Aplikace tedy vypočte E_{p1} a E_{p2} pro všechny přijaté paprsky a ty sečte, pro každou

vysílací anténu zvlášť:

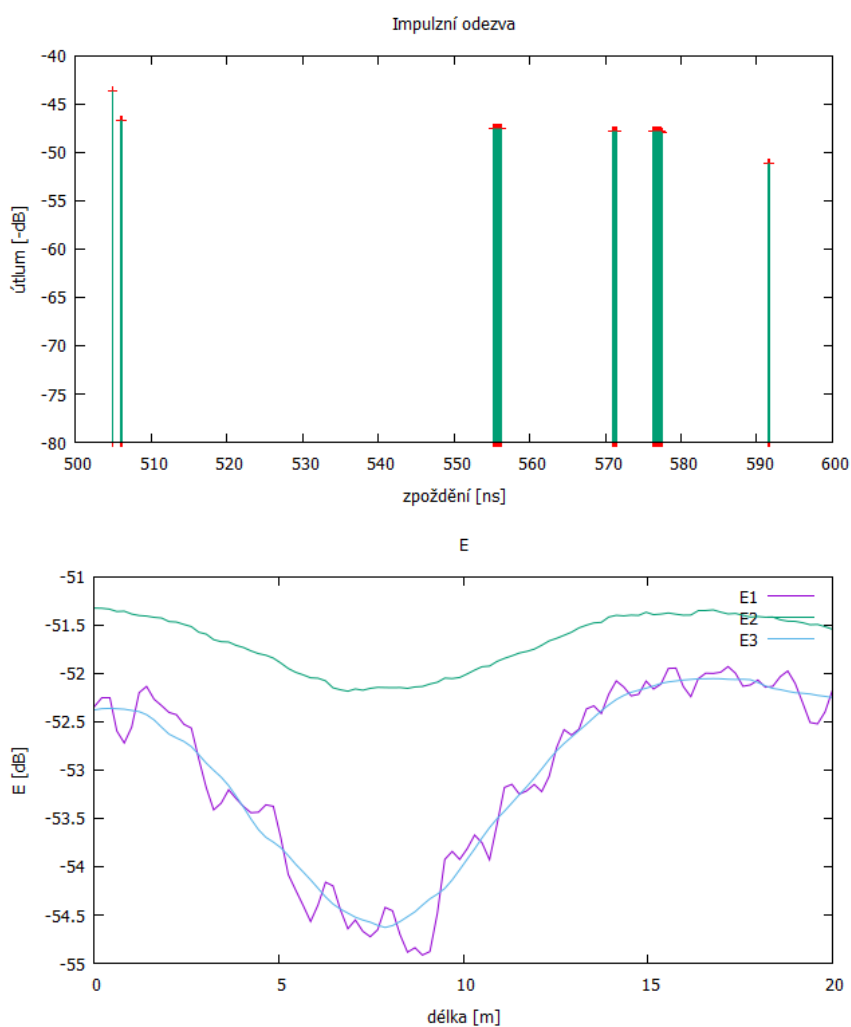
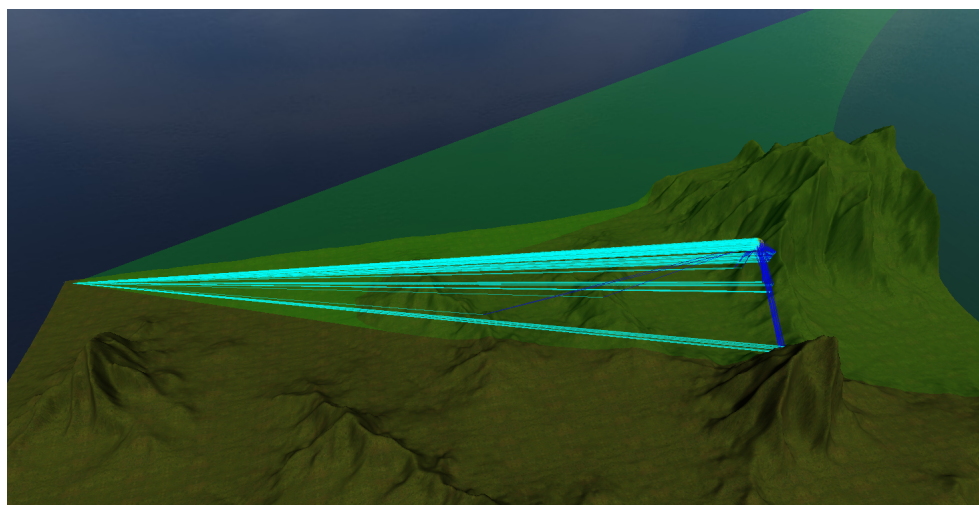
$$E_1 = \sum_p E_{p1} \quad (29)$$

$$E_2 = \sum_p E_{p2} \quad (30)$$

Výsledkem E_1 je fázor, jeho absolutní hodnota $|E_1|$ je intenzita ve vysílací anténě. E_3 se vypočte nakonec klouzavým průměrem z $|E_1|$, velikost okna je vstupní parametr. V grafu jsou na Y ose jednotlivé pozice antén, dle vzdálenosti od té první.

Konkrétní příklad grafu intenzity je vidět v obrázku 18. Jako problém se pro výsledky ukázalo vystřelování paprsků. Díky nim se každá cesta započítává vícenásobně, pouze s drobnými odchylkami. To je něco, s čím si špatně poradí některé vzorce, například přímý výpočet střední hodnoty musel být nahrazen výpočtem klouzavým oknem. Z tohoto hlediska je pro radiotechniku vhodnější metoda analytického hledání paprsků, ta najde vždy jeden paprsek.

V příloze B jsou k dispozici další grafy pro různé testovací scény.



Obrázek 18: Testovací scéna s impulzní odezvou a poměrnou intenzitou

8 Závěr

Tato práce srovnala raytracing v obou oborech z různých hledisek, kromě srovnání simulovaných jevů i implementaci a složitost raytracingu. Konkrétní rozdíly popisují předchozí kapitoly, zde uvedu pouze velice stručně hlavní rozdíly. Tím největším rozdílem ze kterého se ale odvíjí většina dalších je vlnová délka. Díky tomu jsou některé jevy v grafickém raytracingu zanedbatelné, ale v radiotechnice jsou velice důležité a naopak. Příkladem je, že v radiotechnice je nutné uvažovat určitý objem pro přenos energie vlny, kdežto v grafice je tento objem tak malý, že lze snadno redukovat na paprsek. Odrazy v grafice jsou mnohem komplikovanější, protože většina povrchu je v poměru k vlnové délce hrubá a odráží tak do různých směrů. V radiotechnice stačí často pouze zrcadlové odrazy. Difrakce je zase velice důležitá pro radiotechniku a pro počítačovou grafiku snadno zanedbatelná. Kromě toho je v radiotechnice nutné uvažovat konkrétní fázi vlnění a polarizaci, oboje je v grafice snadno zanedbatelné.

Co do složitosti, nejnáročnější jsou v grafice zejména jevy spojené s odrazem, u radiotechniky je to jednoznačně difrakce. V grafice může být konkrétní implementace, založená na sledování paprsků, velice silnou metodou, která dokáže simulovat většinu skutečných jevů při šíření světla. Jde tak o poměrně univerzální a přesnou metodu, byť s relativně velkou výpočetní náročností. V radiotechnice je oproti tomu raytracing jen jednou z metod, která navíc není aplikovatelná univerzálně a není všestranná. Hodí se pouze pro nějaké případy, zejména tam kde je nutné vyšetřovat vícecestné šíření signálu.

Součástí práce byla implementace demonstrační aplikace. Ta se zdařila minimálně z hlediska vizualizace vícecestného šíření. Vypočtené grafy vykazují určité problémy. Ty jsou způsobeny zejména tím, že součástí zadání bylo použití algoritmů z počítačové grafiky, a to znamená vystřelování paprsků. Tato metoda však může započítávat každou cestu vlny vícenásobně a s tím se nedokáží použité vzorce dokonale vypořádat. Analytické hledání paprsků je zřejmě pro radiotechniku vhodnější, ale to se zase téměř nepoužívá v grafice a tak by při implementaci tohoto algoritmu nedávalo smysl porovnání. Přesto grafy ilustrují některé jevy při šíření signálu a jako demonstrační aplikace, například pro výuku poslouží dobře.

Reference

- [1] Pavel Pechač. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spoju*. BEN - technická literatura, Praha, 2007.
- [2] Jiří Žára a Bedřich Beneš a Jiří Sochor a Petr Felkel. *Moderní počítačová grafika*. Computer Press a.s.
- [3] Manuel F. Catedra a Jesús Pérez-Arriaga. *Cell planning for wireless communications*. Artech House, Boston, Mass, 1999.
- [4] Techmania Science Center. Autor: Magda Králová. Under Creative Commons a HAL-LIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.: Fyzika. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000.
- [5] Edward R. Freniere, G. Groot Gregory, and Richard A. Hassler. Edge diffraction in monte carlo ray tracing. 1999.
- [6] Douglas V. Johnston and Paul N. G. Tarjan. Cs348b final project: Ray-tracing interference and diffraction. 2006.
- [7] Douglas V. Johnston and Paul N. G. Tarjan. Ray-tracing interference and diffraction. 2006.
- [8] John Amanatides and Andrew Woo. A fast voxel traversal algorithm for ray tracing.

Příloha A: Obsah přiloženého CD

V tabulce 3 jsou uvedena jména všech kořenových adresářů přiloženého CD s popisem obsahu.

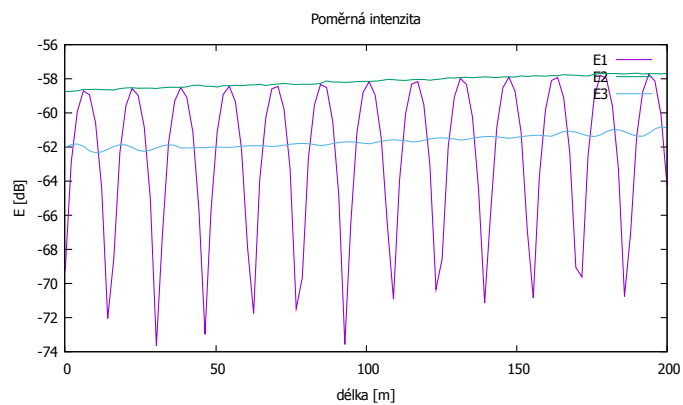
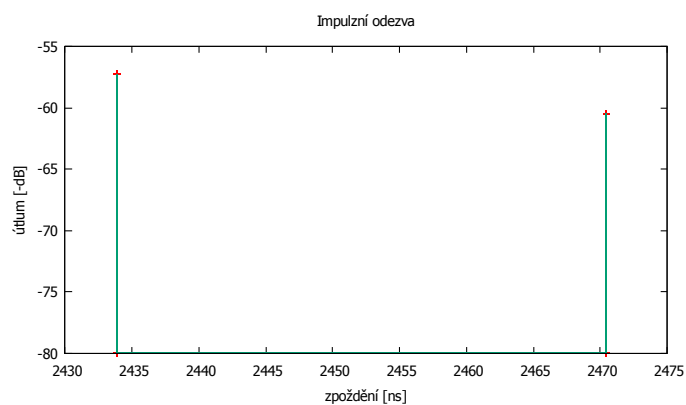
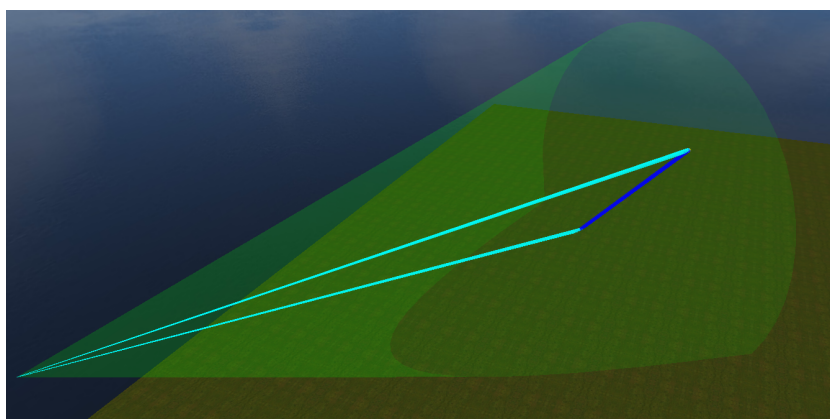
Jméno adresáře	Popis obsahu
dp	diplomová práce ve formátu PDF.
sources	zdrojové kódy demonstrační aplikace
app	zkompilovaná aplikace s různými připravenými scénami
docs	dokumentace zdrojového kódu

Tabulka 3: Obsah CD

Příloha B: Výsledky

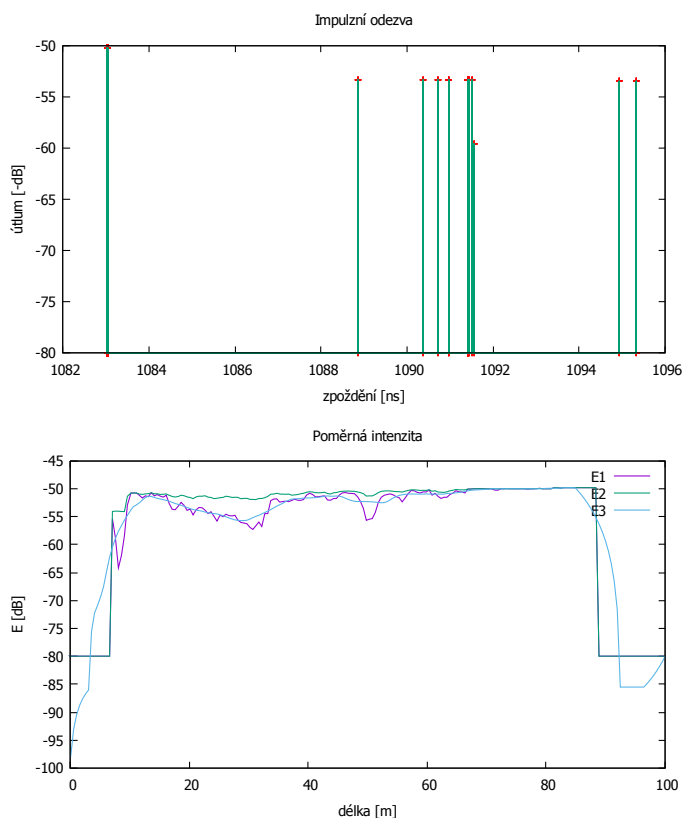
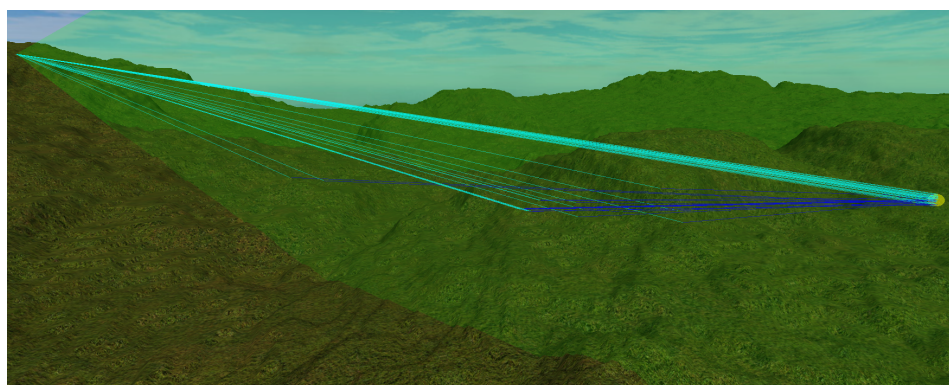
B.1 Jednoduchá scéna

Základní scéna s plochou zemí. Vlnění se šíří přímo a jedním odrazem. Se snižující se vzdáleností se zvyšuje intenzita. Rovněž je vidět vliv fázového sčítání na zvlnění E_2 . Různá minima jsou způsobena vzorkováním.



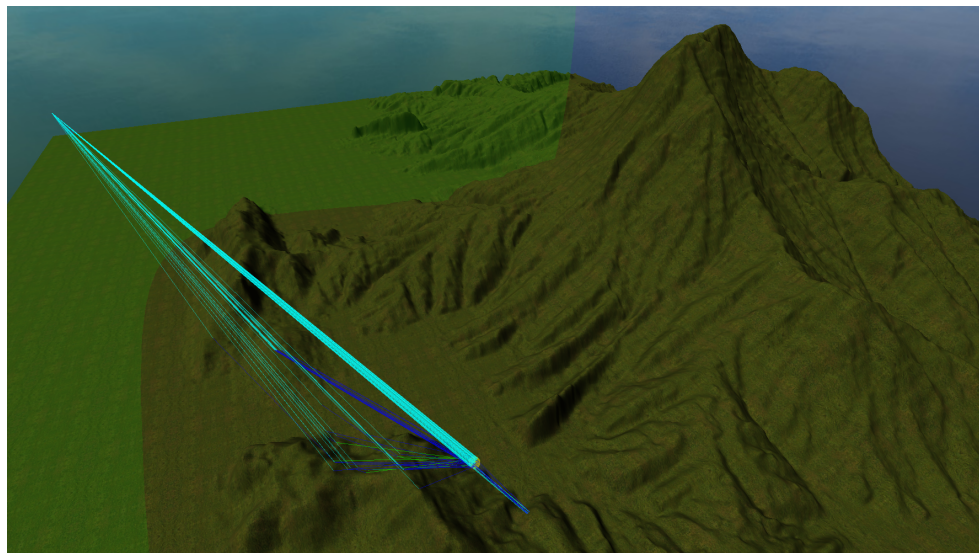
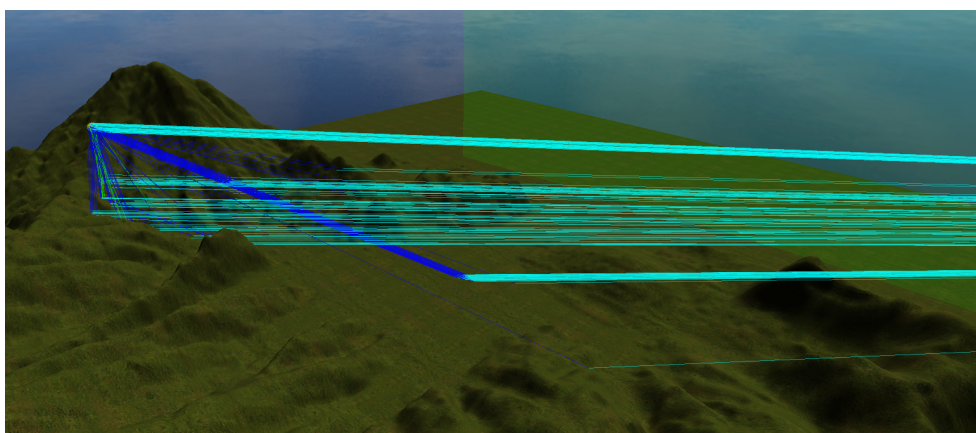
B.2 Reálný terén - okolí města Kadaň

Reálný terén okolí města Kadaň, zdroj: <http://terrain.party/>. Přijímací anténa je nejprve mimo vysílací kužel, následně zachytí pouze odrazy, a na konci je opět zastíněna terénní nerovností. Zde je vidět důležitost difrakce. Útlum při kompletním zastínění je nekonečný, přesto by difrakcí přes hranu nerovnosti anténa zachytila část vlnění. Útlum je proto zobrazen jako 80dB, jde o zvolenou hodnotu v parametrech simulace.



B.3 Scéna s výraznými nerovnostmi

Scéna s výraznými terénními nerovnostmi. Křivka intenzity má zpočátku velmi interferenční charakter. Ten je při posunu antény utlumen, protože je nejvýraznější odraz zastíněn terénní nerovností. Scéna zároveň ilustruje, že téměř nedochází k odrazu od velké terénní nerovnosti, protože jakýkoliv odraz od ní stoupá rychle vzhůru a nedorazí do přijímací antény. Na odraz mají vliv spíše nerovnosti mezi vysílací a přijímací anténou, případně za přijímací anténou.



B.3 Scéna s výraznými nerovnostmi

