

Výpočet vizuálnej dohľadnosti a zodpovedajúceho útlmu mikrovln

Návod k programu „visibility.exe“

Verzia: 9.4.2020

Autor: František Kundracik

1. Úvod

Program „visibility.exe“ slúži na výpočet:

1. Vizuálnej dohľadnosti zo znalosti optických vlastností prachu a distribučnej funkcie počtu častíc prachu od polomeru. Na výpočet sa používa Mieho teória pre guľové častice, je možné zohľadniť povrchový náboj častíc. Okrem štandardnej viditeľnosti pre maximálnu citlivosť oka (555 nm) je možnosť vypočítať aj efektívnu viditeľnosť zahrňujúcu fotopickú krivku citlivosti oka.
2. Útlmu mikrovln (v dB/km) pre zvolené frekvencie. Prach je možné nabiť elektrónmi na zvolený potenciál pri zvolenej teplote.

Všetky integrály sa v programe počítajú adaptívnou lichobežníkovou metódou s voľným krokom. To znamená, že je definovaná minimálna požadovaná relatívna presnosť výsledku a krok integrácie sa adaptívne zjemňuje, až kým presnosť nie je dosiahnutá. Relatívna presnosť je stanovená na 0.001 a je možné ju zmeniť úpravou preprocesorovej konštanty PRECISION v súbore „visibility.c“.

2. Vstupy do programu

Program načítava parametre ako z príkazového riadku, tak aj z konfiguračných súborov.

2.1 Parametre príkazového riadku

V príkazovom riadku sa zadávajú parametre, ktoré sa často menia. To umožňuje efektívne napísať batch-skripty pre hromadné výpočty. Program očakáva v príkazovom riadku nasledujúce parametre:

- Meno súboru s opisom distribučnej funkcie prachu, jeho optických vlastností a hustoty. Opis súboru je nižšie v bode 2.3.
- Celkové množstvo prachu v $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Program podľa tohto údaju preškaluje distribučnú funkciu častíc prachu. V prachových búrkach je dohľadnosť D typicky 5-500 m. Na **odhad** zodpovedajúcej koncentrácie častíc (v $\mu\text{g}/\text{m}^3$) možno použiť zjednodušený vzťah (9) z článku Baddocka a kolektívu [Baddock,2014]:

$$m[\mu\text{g}/\text{m}^3] = \frac{4050}{D[\text{km}]} \quad (1)$$

Je zrejmé, že koeficient vo vzťahu (1) závisí od vlastností prachu.

- Povrchový potenciál častíc prachu.
- Teplota častíc prachu.
- Koeficient úmernosti vo vzťahu $\gamma_S \approx \frac{k_B T}{h}$

- Prepínač photopic/nophotopic – či sa má počítať aj efektívna dohľadnosť so zahrnutím krivky citlivosti oka. Je to zdĺhavý výpočet, pričom obvykle je rozdiel takto získanej viditeľnosti oproti viditeľnosti pre maximum citlivosti (555 nm) úplne zanedbateľný.

2.2 Súbor „frequencies.dat“

V tomto súbore sú definované mikrovlnové frekvencie (v GHz), pre ktoré sa má počítať útlm. V jednotlivých riadkoch sú uvedené hodnoty frekvencie. Pole pre hodnoty sa alokuje dynamicky, počet frekvencií nie je obmedzený.

2.3 Súbor s popisom distribúcie a iných vlastností prachových častíc

Meno tohto súboru je prvým „command-line“ parametrom programu „visibility.exe“. V tomto súbore je plne charakterizovaný prach a očakáva sa, že si užívateľ pripraví separátne súbory pre typické oblasti (napr. sahara.dat, india.dat a podobne). Typický obsah súboru je:

```
# This is a test config file for "visibility" program
2                ... number of distributions (fractions) in
the dust - corresponding lines are below
6e2  0.03  0.33  2600  test_dust.dat... parameters (content [1/cm3], r0[mkm],
sigma(ln(r)), density [kg/m3], refr. index filename
4e0  0.8   0.3   2600  test_dust.dat
1e-3  1e3                ... limits [mkm] of the dust distribution
```

V prvom neokomentovanom riadku je počet dielčích distribúcií (frakcií) prachu. Potom nasleduje jeden riadok pre parametre každej frakcie, pričom sa predpokladá lognormálne rozdelenie. Pre každú frakciu sa zadáva:

- Hodnota maxima
- Poloha maxima (zodpovedajúci polomer častíc) v μm
- Štandardná odchýlka
- Hustota v kg/m^3
- Meno súboru so závislosťou indexu lomu od vlnovej dĺžky

Postup, ako získať uvedené parametre z publikovaných prác, je uvedený v prílohe 1.

V poslednom riadku sú absolútne limity pre rozmer častíc aerosólu. Dôležitý je horný limit, nakoľko častice s veľkými polomermi veľmi ovplyvňujú vlastnosti útlm v optickej aj mikrovlnovej oblasti. Limit 1mm (priemer 2mm) je rozumným odhadom pre rozmer najvyšších častíc vznášajúcich sa v prachovej búrke.

Všetky polia sa alokujú dynamicky, takže nie sú žiadne obmedzenia na počet frakcií. Celková doba výpočtu však, samozrejme, s počtom frakcií narastá.

2.4 Súbory s popisom indexu lomu prachových častíc

Súbory majú jednoduchú štruktúru: v každom neokomentovanom riadku sú 3 čísla: vlnová dĺžka (v mkm), reálna a imaginárna časť indexu lomu:

```
# Test file for refractive index
# wavel [mkm]      real_part[-]      imag_part[-]
0.300 1.53  0.004
0.500 1.52  0.003
0.900 1.51  0.002
1e2   1.5   0.1
1e5   1.5   0.1
```

Hodnoty pre iné vlnové dĺžky sa získavajú lineárnou interpoláciou, resp. sa použije hodnota indexu lomu pre najmenšiu alebo najväčšiu vlnovú dĺžku, ak je vlnová dĺžka mimo rozsahu súboru. Polia pre hodnoty indexu lomu sa alokujú dynamicky, na dĺžku súborov nie sú preto žiadne obmedzenia.

Opis postupu pre získanie hodnôt indexu lomu z literatúry je opísaný v prílohe 2.

3. Výstupy programu

Priebežný stav výpočtu obraz vypisuje do konzoly, výsledky výpočtu sa ukladajú do dvoch dátových súborov a jedného pomocného súboru.

3.1 Súbor „visibility.dat“

Tento súbor obsahuje detailné výsledky výpočtu a pri opakovanom spustení programu „visibility.exe“ sa jeho obsah nahradí novým. V súbore „visibility.dat“ sú najprv uložené všetky vstupné parametre, takže je z neho možné získať ako parametre príkazového riadku, tak aj všetky vstupné súbory. Okrem toho sa v súbore nachádzajú nasledujúce vypočítané údaje:

- Použité distribučné funkcie frakcií a sumárna distribučná funkcia – vhodné pre vykreslenie grafov $dn/d(\ln r)$.
- Dohľadnosť pri 555 nm.
- Ak bol zapnutý flag „photopic“:
 - efektívna dohľadnosť zahrňujúca citlivosť oka.
 - závislosť dohľadnosti od vlnovej dĺžky <400 nm – 800 nm>.
- Útlm mikrovln pre frekvencie definované v súbore „frequencies.dat“.

3.2 Súbor „plot.dat“

Obsah tohoto súboru sa nevymazáva, po každom spustení programu „visibility.exe“ pribudne v súbore jeden riadok s nasledujúcimi údajmi:

- Meno konfiguračného súboru s popisom distribúcie prachu
- Hmotnostná koncentrácia prachu (v $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- Dohľadnosť pri 555 nm (v km)
- Efektívna dohľadnosť v km (ak bol zapnutý flag „photopic“)
- Hodnoty útlmu mikrovln (v dB/km) pre frekvencie zadané v súbore „frequencies.dat“

Súbor „plot.dat“ je vhodný na vykresľovanie:

- Frekvenčnej závislosti útlmu pre rôzne parametre
- Závislosti útlmu od rôznych parametrov pre rôzne frekvencie
- 3D- grafu frekvencia-parameter-útlm
- Závislosti dohľadnosti od hmotnostnej koncentrácie prachu

3.3 Súbor „plothead.dat“

V tomto súbore sa pri každom spustení programu „visibility.exe“ vygeneruje hlavička patriaca k súboru „plot.dat“. Obsahom hlavičky je riadok s názvom a riadok s pomenovaniami stĺpcov. Predpokladá sa, že zoznam frekvencií definovaný v súbore „frequencies.dat“ sa nemení, inak by bol obsah súboru „plot.dat“ nekonzistentný.

Príloha 1 – parametre distribúcie prachových častíc

V literatúre sa väčšinou možno stretnúť s dvoma distribučnými funkciami prachu:

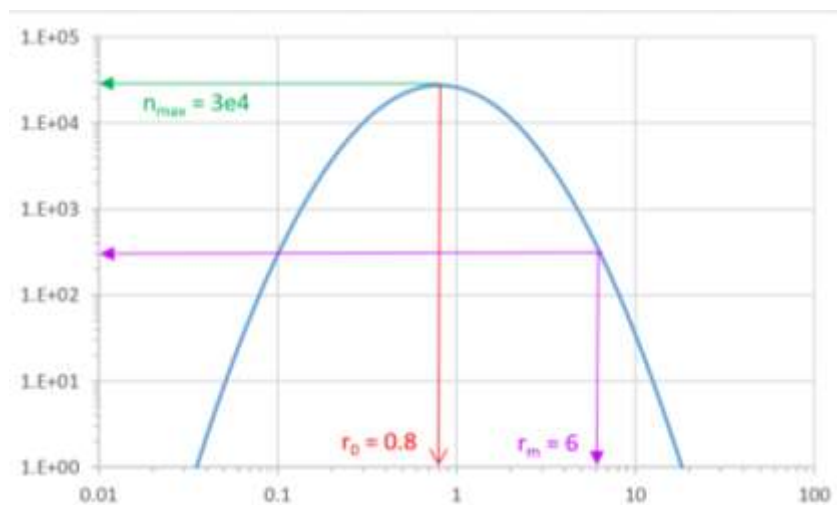
- $dn/d(\ln r)$ – kde n je koncentrácia častíc ($1/m^3$). Výsledky sú prezentované graficky tak, že na logaritmickú os x je polomer častíc, na osi y je $dn/d(\ln r)$, obvykle je aj os y logaritmická.
- $dV/d(\ln r)$ – kde V je objemová koncentrácia častíc (bezrozmerné číslo alebo odvodená jednotka napr. $\mu m^3/m^3$).

Program „visibility.exe“ očakáva nasledujúce parametre charakterizujúce distribučnú funkciu $dn/d(\log r)$ jednotlivých frakcií:

- $n_0 [1/cm^3]$ – koncentrácia častíc
- $r_0 [\mu m]$ – poloha maxima
- štandardná odchýlka σ

Spôsob získania týchto údajov z grafu $dn/d(\ln r)$ je opísaný v ďalšom texte. Postup vychádza z tvaru lognormálneho rozdelenia

$$\frac{dn}{d(\ln r)} = \frac{n_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln r - \ln r_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$



Obr. 1. Lognormálna distribučná funkcia $dn/d(\ln r)$

Krok 1: Zistenie polohy maxima r_0 .

Tento údaj odčítame priamo z grafu (obr. 1), $r_0 = 0,8$.

Krok 2: Zistenie štandardnej odchýlky σ .

Nájdeme hodnotu maxima (na obr. 1 je to zelenou farbou označená hodnota $3 \cdot 10^4$). Ďalej nájdeme hodnotu o m -rádov nižšiu, m si môžeme ľubovoľne zvoliť. Na obrázku 1 je fialovou farbou znázornená hodnota $3 \cdot 10^2$ menšia o 2 rády ($m=2$). Určíme zodpovedajúcu hodnotu polomeru $r_m = 6$. V tomto bode je podiel hodnoty a maxima rovný

$$10^{-m} = e^{-\frac{(\ln \frac{r_m}{r_0})^2}{2\sigma^2}}$$

Odkiaľ dostávame

$$-m = -\frac{(\ln \frac{r_m}{r_0})^2}{2\sigma^2} \log e$$

a

$$\sigma = \sqrt{\frac{\log e}{2m}} \ln \frac{r_m}{r_0} \quad (3)$$

Pre hodnoty z obrázku 1 dostávame:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\log e}{2 \cdot 2}} \ln \frac{6}{0,8} = 0,66$$

Krok 3: Zistenie celkovej koncentrácie n_0 .

Z grafu určíme hodnotu maxima, na obrázku 1 je to hodnota $n_{\max} = 3 \cdot 10^4$. Zo vzťahu (2) priamo vyplýva:

$$n_0 = n_{\max} \sigma \sqrt{2\pi} \quad (4)$$

Z obrázku 1 teda dostávame $n_0 = 3 \cdot 10^4 \cdot 0,66 \cdot 2,50 = 4,9 \cdot 10^4$.

Poznámky:

- Vzhľadom k symetrii rozdelenia môžeme hodnotu r_m odčítať aj vľavo od maxima a vo vzťahu (2) nahradiť pomer r_m/r_0 pomerom r_0/r_m . Takisto je možné ako pomer použiť druhú odmocninu z pomeru „pravej“ a „ľavej“ hodnoty r_m .
- Niekedy je v literatúre uvádzaná distribučná funkcia častíc od ich **priemeru**, nie od ich polomeru. Vtedy treba za r_0 vziať polovicu polohy maxima d_0 . Hodnota σ ostáva bez zmeny, hodnotu n_0 tiež môžeme ponechať bez zmeny, lebo program ju vždy preškáluje na zvolenú celkovú hmotnosť častíc (pozri nasledujúci bod).
- U frakcií je dôležitý iba vzájomný pomer ich hodnôt n_0 , nie samotné hodnoty. Program „visibility.exe“ preškáluje hodnoty n_0 tak, aby sa dosiahla požadovaná hmotnostná koncentrácia v $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Ak máme k dispozícii iba grafy $dV/d(\ln r)$, pokračujeme formálne rovnako a určíme hodnoty r_{0v} , σ_v a n_{0v} . Tie potom prepočítame na skutočné hodnoty pomocou vzťahov uvedených v Tabuľke 1 v článku Graingera [Grainger,2017]:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_v \\ \ln r_0 &= \ln r_{0v} - 3\sigma^2 \\ n_0 &= \frac{n_{0v}}{\frac{4}{3}\pi e^{(3 \ln r_0 + 4.5\sigma^2)}} \end{aligned} \quad (5)$$

- Pre interné výpočty integrálov v programe „visibility.exe“ nepotrebujeme funkciu $dn/d(\ln r)$, ale funkciu dn/dr . Tú ale v programe získame jednoducho:

$$\frac{dn}{dr} = \frac{dn}{d(\ln r)} \frac{d(\ln r)}{dr} = \frac{1}{r} \frac{dn}{d(\ln r)} \quad (6)$$

Príloha 2 – index lomu prachových častíc

V literatúre sa dá nájsť komplexný index lomu pre „čisté“ minerály a pre optickú oblasť spektra. V rádiovlnovej oblasti sa obvykle uvádza komplexná permitivita materiálu (index lomu je odmocninou z komplexnej permitivity). Navyše je známe, že adsorbovaná voda výrazne ovplyvňuje permitivitu prachu, a tým aj mikrovlnové straty. Vplyv relatívnej vlhkosti sa dá modelovať empirickými vzťahmi uvedenými napríklad v práci Sharifa [Sharif,2015]:

$$\begin{aligned} \varepsilon'(H) &= \varepsilon' + 0,04H - 7,78 \cdot 10^{-4}H^2 + 5,56 \cdot 10^{-6}H^3 \\ \varepsilon''(H) &= \varepsilon'' + 0,02H - 3,71 \cdot 10^{-4}H^2 + 2,76 \cdot 10^{-6}H^3 \end{aligned} \quad (7)$$

kde $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ je efektívna relatívna permitivita a H je relatívna vlhkosť v percentách.

Pre uľahčenie prepočtu komplexnej permitivity na index lomu (so zohľadnením vlhkosti) sme pripravili nástroj „eps2n.exe“.

Po jeho spustení treba zadať reálnu a imaginárnu časť permitivity a program vypíše tabuľku komplexnej permitivity a komplexného indexu lomu pre rôzne relatívne vlhkosti:

Zadaj cisla eps' a eps'' komplexnej permitivity eps' - i*eps'':
6.3485 0.0929

```
eps = 6.3485 - i * 0.0929
eps' - i *eps''      n' - i*n'':
rel.vlhkost[%]  eps'   eps''      n'       n''
0                6.3485  0.0929      2.51969  0.0184348
10               6.67626  0.25856     2.58433  0.0500246
20               6.88178  0.36658     2.62424  0.0698449
30               6.99842  0.43352     2.64672  0.0818976
40               7.05954  0.47594     2.65849  0.0895133
50               7.0985   0.5104      2.66602  0.0957232
60               7.14866  0.55346     2.6757   0.103424
70               7.24338  0.62168     2.69383  0.11539
80               7.41602  0.73162     2.72654  0.134166
90               7.69994  0.89984     2.77959  0.161865
100              8.1285   1.1429      2.85805  0.199944
```

Pre permitivitu suchého prachu v mikrovlnovej oblasti sme na ilustráciu použili hodnotu 6.3485 – i*0.0929 pre prach z Líbye (tabuľka IV v [Saleh,2010]).

Príloha 3 – testovacie výpočty

P3.1 Overenie potrebného rozsahu rozmerovej distribučnej funkcie prachu

Na otestovanie programu sme použili údaje o typickom prachu zo severu Afriky (Alžírsko, Tunisko, Maroko Líbya). **Distribúciu prachu sme použili z práce Denjeana** [Denjean,2016], obr. 3a, kde autori uvádzajú namerané údaje aj ich model so štyrmi frakciami. Použitím vzťahov (3) a (4) sme určili parametre do konfiguračného súboru „mediterian.cfg“:

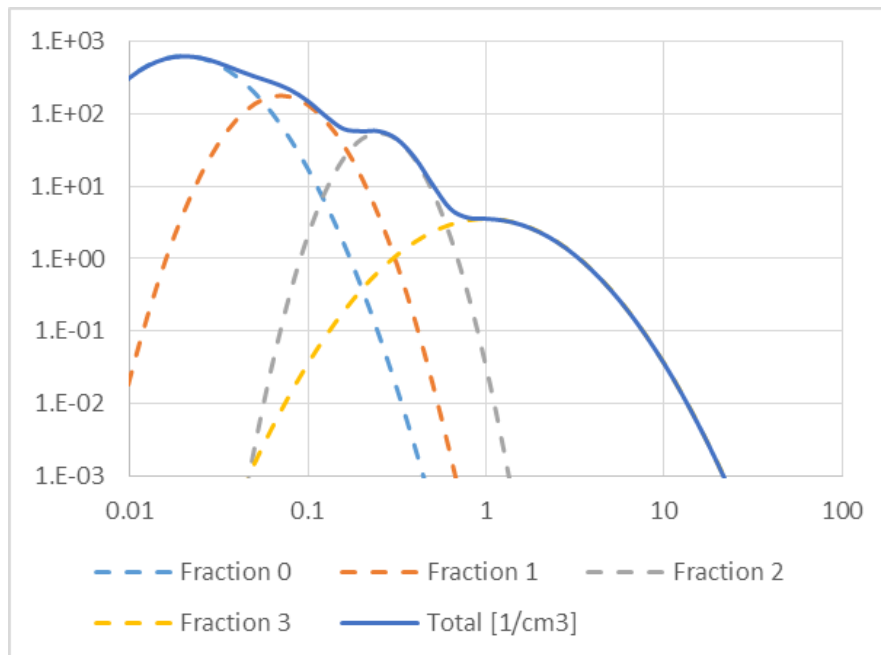
```
4      ... number of distributions (fractions) in the dust
1050  0.02  0.6   2600  mediterian_n.dat  ... parameters
230   0.07  0.46  2600  mediterian_n.dat
54.1  0.25  0.36  2600  mediterian_n.dat
```

```

7.6 1.0 0.76 2600 mediterian_n.dat
1e-2 1e2 ... limits [mkm] of the dust distribution

```

Zodpovedajúca distribučná funkcia (zo súboru „visibility.dat“ – výstupu programu „visibility.exe“):



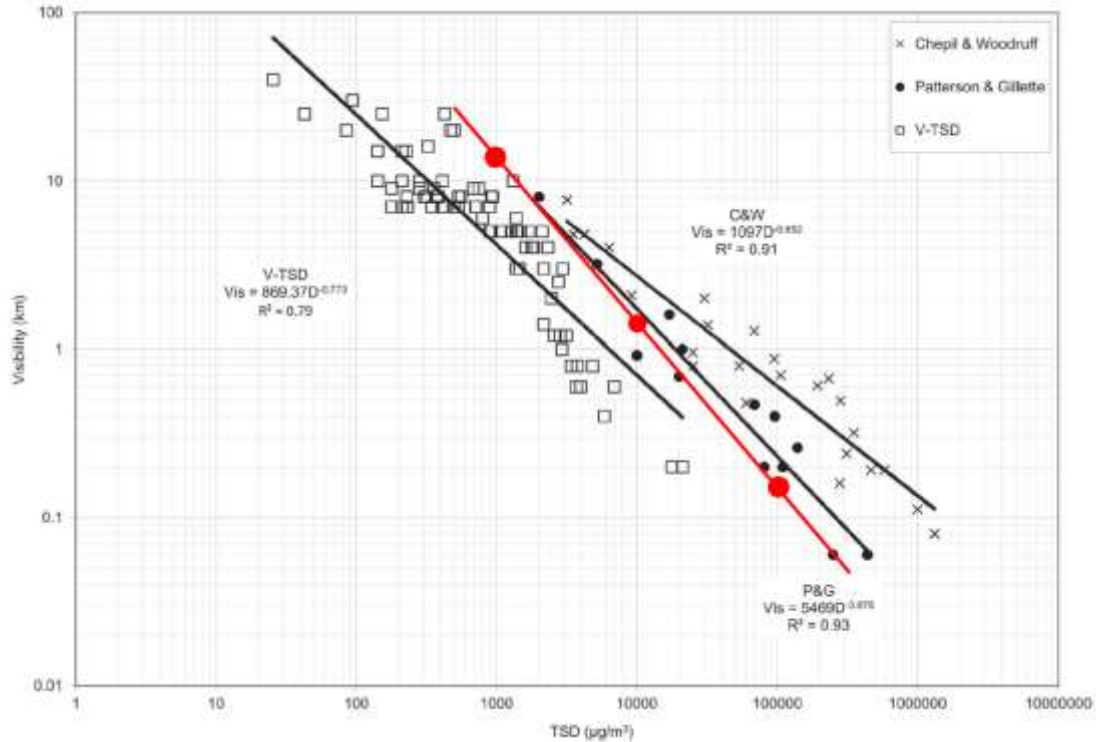
Ako hustotu sme použili 2600 kg/m^3 (typická hodnota pre minerály), za index lomu vo viditeľnej oblasti sme použili hodnotu $1,53 - 0,004 \cdot i$ z práce Denjeana [Denjean,2016].

Celkový limit rozmerovej distribúcie sme nastavili na $\langle 0,01 ; 100 \rangle \mu\text{m}$, lebo mimo tohto intervalu už distribučná funkcia veľmi klesala. Overili sme, že rozšírenie tohto intervalu na $\langle 0,001 ; 1000 \rangle \mu\text{m}$ zmenilo vypočítanú dohľadnosť o menej než 0,1%, vplyv na útlm v mikrovlnovej oblasti bol ešte menší. **Horný limit na polomer častíc prachu o veľkosti $1000 \mu\text{m}$ (priemer maximálne 2 mm) sa teda javí ako s rezervou dostatočný.**

P3.2 Porovnanie vypočítanej dohľadnosti s údajmi iných autorov

Náš výpočet dohľadnosti (teda komplexný integrál cez distribučnú funkciu prachu) sme porovnali s obr. 4 práce Baddocka [Baddock,2014], kde sú uvedené závislosti dohľadnosti od hmotnostnej koncentrácie prachu (v $\mu\text{g/m}^3$) od rôznych autorov.

Hodnoty dohľadnosti pri 555 nm vypočítané pre náš model suchého a nenabitého prachu sú do obrázku dokreslené červenou farbou. Naše údaje potvrdzujú závery Baddocka [Baddock,2014], že dohľadnosť je nepriamo úmerná obsahu prachu v $\mu\text{g/m}^3$. Tu treba pripomenúť, že náš program zanedbáva Rayleighov rozptyl, a preto nami vypočítané veľké viditeľnosti (nad niekoľko km) sú nadhodnotené. V prachových búrkach (čo je náš okruh záujmu) je však Rayleighova zložka rozptylu v porovnaní s rozptylom na prachu zanedbateľná.



Preto môžeme konštatovať, že našim modelom vypočítaná dohľadnosť pre severoafrický prach sa dobre zhoduje s nameranými údajmi iných autorov.

P3.3 Porovnanie štandardnej a efektívnej viditeľnosti

V ďalšom kroku sme porovnali vypočítanú dohľadnosť pri 555 nm s efektívnou dohľadnosťou zahrňujúcou krivku citlivosti oka pri typickej hmotnostnej koncentrácii 1000 µg/m³:

Viditeľnosť pri 555 nm: 15,506 km

Efektívna viditeľnosť: 15.498 km

Rozdiel je menší než presnosť výpočtu 0.1% (teda 0,015 km). Skúšali sme porovnávať obe viditeľnosti pre rôzne situácie, a ani pre extrémne prípady (veľmi veľké častice, veľmi malé častice, častice s jedným rozmerom, ...) sme nezistili rozdiel väčší než 1%. **Preto považujeme zdĺhavý výpočet efektívnej dohľadnosti (numerické hľadanie parametra v integrálnej rovnici) za zbytočný.**

P3.4 Mikrovlnový útlm – údaje o imaginárnej časti permitivity

Výpočet mikrovlnového útlmu sa v ničom nelíši od výpočtu útlmu v optickej oblasti (teda od výpočtu dohľadnosti):

$$A[\text{dB/km}] = -10 \cdot \log(\exp(-b \cdot 1000)) = 4343 \cdot b \quad (8)$$

kde b je objemový koeficient extinkcie v m⁻¹.

Jediným rozdielom je zmena indexu lomu a vlnovej dĺžky. Problémom však je, že **údaje o imaginárnej časti permitivity sa v literatúre rádovo líšia.**

Napríklad Saleh (tabuľka IV v [Saleh,2010]) pre permitivitu suchého prachu z Líbie v mikrovlnovej oblasti uvádza hodnotu $6.3485 - i \cdot 0.0929$. Ako sme ukázali v Prílohe 2, vysoká vlhkosť (100%) môže zvýšiť imaginárnu časť permitivity až o rád, ale iní autori uvádzajú ešte vyššie hodnoty permitivity. Elabdin sumarizuje údaje od viacerých autorov (tabuľka 1 v [Elabdin,2009]), ktoré sú ešte vyššie, a pritom nie pre nereálnu vlhkosť 100%:

Frequency Band	ϵ'	ϵ''	Reference
S-band	4.56	0.25	Ghobrial [22]
X-band	5.73	0.42	Ghobrial and Sharief [23]
Ku-band	5.5	1.3	Ruike [24]
K-band	5.1	1.4	Ruike [24]
Ka-band	4	1.33	Ruike [24]
W-band	3.5	1.64	Ruike [24]

Rádový rozdiel v imaginárnej časti permitivity však vedie až k rádovému rozdielu útlmu (v dB/km), čo kladie veľký dôraz na presnosť údajov o permitivite materiálu.

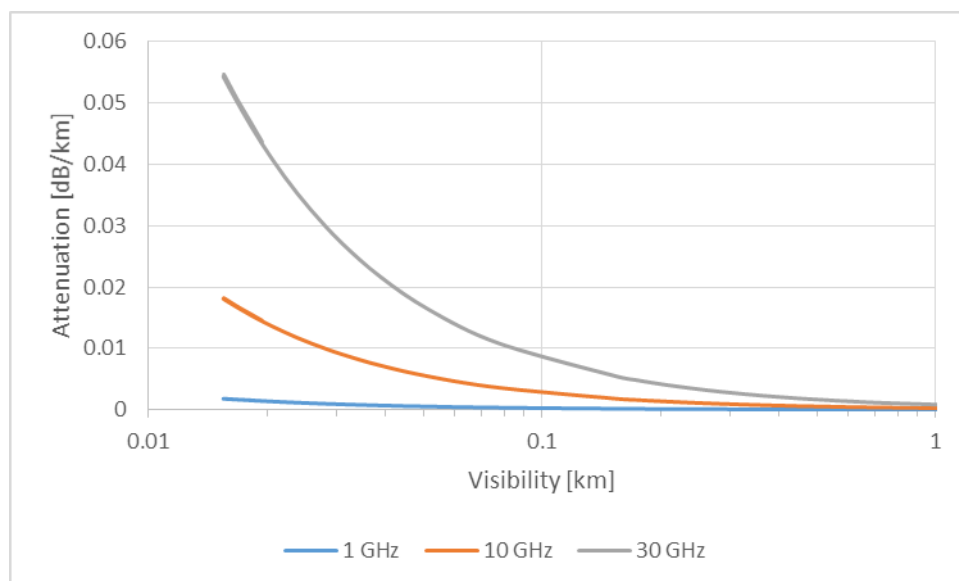
P3.5 Mikrovlnový útlm – vplyv veľkých častíc

Hlavným rozdielom medzi „bežným“ aerosólom v atmosfére a aerosólom počas prachovej búrky je, že počas búrky sa v atmosfére vznášajú aj pomerne veľké prachové častice, ktoré sa inak veľmi rýchlo usadzujú.

Testovací výpočet pre „bežný“ aerosól sme urobili pre prach z Líbye pri 40% relatívnej vlhkosti (pozri prílohu 2):

$$n = 2,65 - i \cdot 0,089.$$

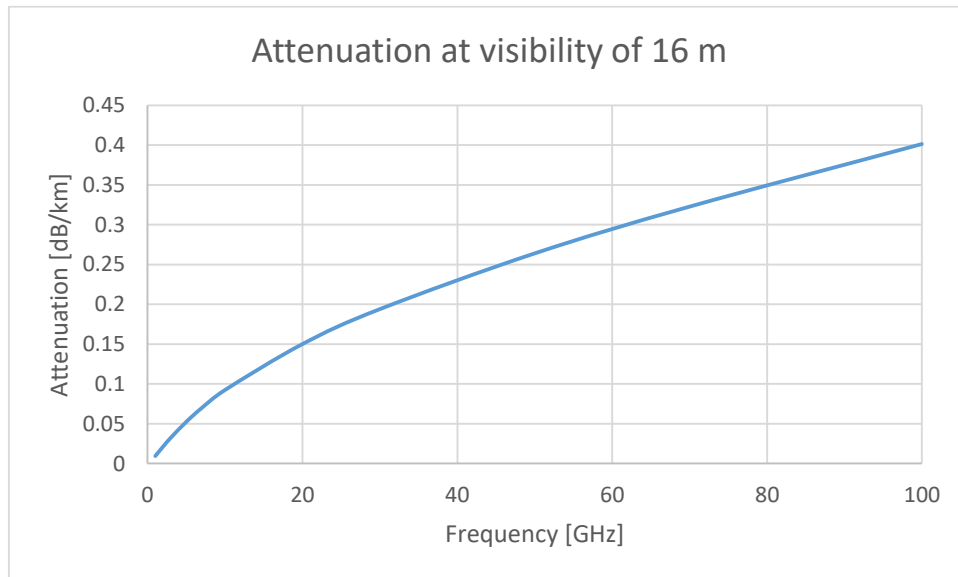
Závislosť útlmu od viditeľnosti (graf z údajov vo výstupnom súbore „plot.dat“):



Vypočítané hodnoty sú oveľa menšie než hodnoty namerané počas prachových búrok. Napríklad pre 40 GHz a viditeľnosť 0.625 km uvádza [Elabdin,2009] nameraný útlm 0,14 dB/km, nami vypočítaná hodnota pre „bežný“ aerosól je asi 0,0017 dB/km.

Po uvážení potenciálu 50 V sa útlm prudko zvýšil na 0.0056 dB/km (pri rovnakej viditeľnosti a frekvencii), ale aj tak je to rádovo menšia hodnota, než pozorovaný útlm.

Na ďalšom obrázku je frekvenčná závislosť útlmu pri viditeľnosti 16 m a potenciálom 50 V:



Hodnoty by ale mali byť podľa experimentov v ráde jednotiek dB/km.

Pri hľadaní hlavnej príčiny rozdielu medzi útlmom počas búrok a počas bežných dní sme menili aj imaginárnu časť indexu lomu a elektrický potenciál prachových zrní, ale nebolo možné dosiahnuť experimentálne pozorované hodnoty.

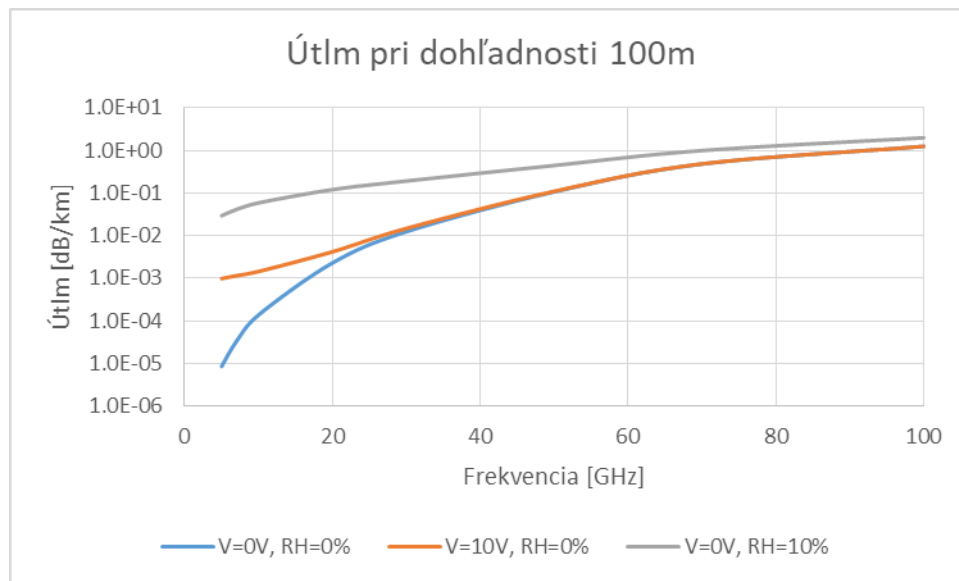
Preto sme prišli k záveru, že podstatnou príčinou by mala byť prítomnosť veľkých častíc počas prachových búrok, kde typický rozmer prachových častíc býva obvykle (napr. [Fadil,2018]) 1- 100 μm , zatiaľ čo pri kludnej atmosfére to býva 0,1 – 10 μm (pozri Prílohu 3.1). Na to, že pri prachových búrkach sa v atmosfére objavujú častice s relatívne veľkými polomerami, upozornil už Kandler [Kandler,2009]. Z jeho článku sme prebrali z Tabuľky 4 distribúciu častíc zistenú počas prachovej búrky v Maroku, kde pribudla najmä najväčšia frakcia ($r_0 = 76.95 \mu\text{m}$) tvorená prevažne SiO_2 :

content [1/cm ³],	$r_0[\mu\text{m}]$	$\sigma(\ln(r))$
367.8	0.0353	0.703
117.9	0.372	0.582
3.839	0.866	1.313
0.03189	76.95	0.3228

Prepočet medzi údajmi z článku a našimi parametrami: $r_0 \leftarrow d_0/2$, $\sigma \leftarrow \ln(\sigma)$, $n_0 \leftarrow n_0$.

Je to tá istá distribúcia, akú sme použili v článku v Annalen de Physik [Kocifaj,2015]. Za index lomu v optickej oblasti sme použili Tabuľku 6 práce Kandlera [Kandler,2009]. Za permitivitu v mikrovlnovej oblasti sme použili opäť hodnotu 6.3485 pre **prach z Líbye** (tabuľka IV v [Saleh,2010]). Keďže však najväčší vplyv na útlm v mikrovlnovej oblasti má najväčšia frakcia (Rayleighov rozptyl) tvorená nízkostratovým SiO_2 , imaginárnu časť sme položili rovnú nule (**bezstratové dielektrikum**).

Výsledky výpočtov pre potenciál $V = 0\text{V}$ a $V = 10\text{V}$ a pre vlhkosť $H = 0\%$ a $H=10\%$ (typická hodnota pre púšte) sú v nasledujúcom obrázku.



Vidíme, že sa nám podarilo zreprodukovať výsledky z článku v Annalen der Physik [Kocifaj,2015] (zvýšenie útlmu cca o 2 rády pri frekvenciách cca 10 GHz, malé zmeny útlmu pri frekvenciách nad 50 GHz), ktoré zodpovedajú aj reálne pozorovaným útlmom počas prachových búrok. Je zaujímavé, že efekt vlhkosti na útlm je ešte výraznejší (pri nižších frekvenciách).

Samotné hodnoty útlmu so zohľadnením vlhkosti sa dobre zhodujú s údajmi z práce Fadila [Fadil,2018]. Fadilove výpočty pre H = 0% dávajú výrazne vyšší útlm, lebo Fadil uvažuje pomerne vysokú imaginárnu časť indexu lomu suchého materiálu (my sme uvažovali bezstratový materiál).

Pre dobrý odhad útlmu mikrovln je teda nutná dobrá znalosť rozmerovej distribúcie častíc (najmä frakcie s najväčším stredným rozmerom). Takisto veľký vplyv má relatívna vlhkosť vzduchu, všetky články venované vplyvu vlhkosti na útlm v mikrovlnovej oblasti sa odvolávajú iba na empirický vzťah z práce Sharifa [Sharif,2015].

Literatúra

- [Baddock,2014] M.C. Baddock et al.: A visibility and total suspended dust relationship. Atmospheric Environment 89 (2014) 329-336.
- [Denjean,2016] C. Denjean et al: Size distribution and optical properties of mineral dust aerosols transported in the western Mediterranean. Atmos. Chem. Phys., 16, 1081–1104, 2016
- [Elabdin,2009] Z. Elabdin et al: Mathematical model for the prediction of microwave signal attenuation due to duststorm. Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 6, 139–153, 2009.
- [Fadil,2018] S.Fadil, N.Abumahound: Prediction of Microwave Signal Attenuation due to Dust and Sand Storms at (4-18 GHz). Case of study (south of Libya). https://www.researchgate.net/publication/325546374_Prediction_of_Microwave_Signal_Attenuation_due_to_Dust_and_Sand_Storms_at_4-18_GHz_Case_of_Study_Southern_Libya

- [Grainger,2017] R.G. Grainger: Some Useful Formulae for Aerosol Size Distributions and Optical Properties.
<http://eodg.atm.ox.ac.uk/eodg/gray/2013Grainger.pdf>
- [Kandler,2009] K. Kandler et al: Size distribution, mass concentration, chemical and mineralogical composition and derived optical parameters of the boundary layer aerosol at Tinfou, Morocco, during SAMUM 2006.
Tellus (2009), 61B, 32–50.
- [Kocifaj,2015] M. Kocifaj et al: Charge-induced electromagnetic resonances in nanoparticles.
Ann. Phys. (Berlin) 527, No. 11–12, 765–769 (2015) / DOI 10.1002/andp.201500202
- [Saleh,2010] I.M. Saleh: Effect of sand and dust storms on microwave propagation signals in Southern Libya.
MELECON 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, DOI: 10.1109/MELCON.2010.5475995
- [Sharif,2015] Sami M. Sharif: Attenuation Properties of Dusty Media Using Mie Scattering Solution.
Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 43, 9–18, 2015.