

# ANALÝZA A OPTIMALIZACE KONCEPCE LASEROVÉHO DRUŽICOVÉHO KOMUNIKAČNÍHO SYSTÉMU

Ing. Markéta MAZÁLKOVÁ, Doc. Ing. Miroslav TITL, CSc

Univerzita obrany

## Abstrakt

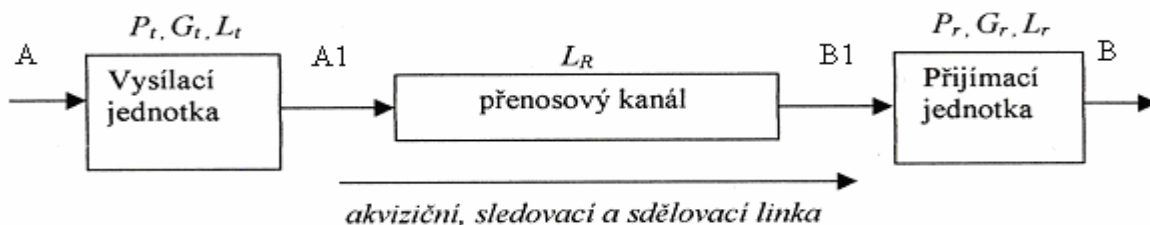
Koncepce laserového družicového komunikačního systému je podrobně analyzována pomocí matematicko-fyzikálních relací pro jedno a více-parametrické korelace, které popisují jednotlivé prvky laserové družicové komunikační rovnice. Optimalizace návrhu hodnot parametrů odpovídajících takticko-technickým požadavkům je prováděna na základě originálního počítačového programu v prostředí MATLAB.

## 1 Úvod

Hlavním cílem studentské aktivity, jejíž komplexní výsledky jsou uvedeny ve výzkumné zprávě [1], bylo navrhnout a optimalizovat koncepci laserového družicového komunikačního systému (LDKS).

V příspěvku je presentován dílčí výsledek počítačové implementace více-parametrických korelací analýzy a optimalizace návrhu koncepce LDKS v programovém prostředí MATLAB.

Základním východiskem pro analýzu LDKS je laserová komunikační rovnice (LKR), vyjadřující závislost výkonů, zisků a ztrát při přenosu signálů. Vychází ze základního schématu uvedeného na Obr. 1. Laserový družicový komunikační systém se skládá z vysílací a přijímací jednotky a z přenosového kanálu pro tři linky - akviziční, sledovací a sdělovací.



Obrázek 1. Základní schéma přenosu laserového komunikačního systému

Laserová komunikační rovnice je v základním tvaru vyjádřena parametry dle vztahu

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot L_t \cdot L_R \cdot G_r \cdot L_r, \quad (1)$$

- kde  $P_t$  výkon laserového zdroje vysílaného optického signálu [W],  
 $P_r$  výkon optického signálu na fotodetektoru přijímací jednotky [W],  
 $G_t$  efektivní zisk vysílací jednotky [dB],  
 $G_r$  efektivní zisk přijímací jednotky [dB],  
 $L_t$  optické ztráty vysílací jednotky [dB],  
 $L_r$  optické ztráty přijímací jednotky [dB],  
 $L_R$  ztráty při šíření volným prostorem [dB],  
A data od zdroje informace,  
A1 kódovaný a modulovaný optický signál,  
B1 optický signál před detekcí,  
B data k uživateli informace.

Dále jsem se zabývala rozvojem výše uvedených parametrů.

## **2 Počítačová implementace matematicko-fyzikálních více-parametrických korelací analýzy a optimalizace laserového družicového komunikačního systému**

S ohledem na dosažení hlavního cíle, uvedeného výše, byly definovány dílčí cíle jejichž obsahem bylo provedení matematicko-fyzikální analýzy základních parametrů a charakteristik pro návrh LDKS, dále přenos komunikačních a řídicích signálů mezi družicemi na reálných drahách GEO a LEO, návrh technologické báze řešení koncepce LDKS a konečně implementace počítačové podpory analýzy a optimalizace více-parametrických korelací v koncepci LDKS v programovém prostředí MATLAB. realizované programem s grafickými výstupy, umožňující optimalizovat parametry LDKS z hlediska aktuálních potřeb.

Rozsah originálu aplikace [1] je více než 90 stran textu a tudíž přesahuje možnosti této publikace. Originál aplikace řeší komplexně počítačovou podporu analýzy a optimalizace koncepce LDKS z hlediska návrhu vstupních parametrů, vstupních a výstupních ztrát, ztrát při šíření mezi družicemi a energetické bilance spoje.

Matematicko-fyzikální báze popisu výše uvedených systémových hledisek je uvedena v již citovaném originále [1] a je východiskem pro počítačovou implementaci programu více-parametrických korelací.

V rámci splnění požadavků na tuto publikaci, bude dále presentován pouze výběr několika aplikací ze zprávy [1] počítačové podpory analýzy a optimalizace LDKS s odpovídajícími výpisy programů a souvisejícím grafickým zobrazením více-parametrických korelací systémové optimalizace LDKS.

Počítačovou podporou optimalizace návrhu LDKS je originální program vytvořený v programovém prostředí Matlab. Program postupně počítá zvolení více-parametrické korelace a převádí je do grafické podoby. Z grafů je možné určit optimální hodnoty zvolených parametrů přenosového systému podle zadaných kritérií.

### **2.1 Výpisy programů více-parametrických korelací laserového družicového komunikačního systému**

#### **Seznam použitých symbolů a zkratek**

dB	decibel
GEO	geostacionární dráhy
lambda	vlnová délka
LEO	nízké kruhové dráhy
LDKS	laserový družicový komunikační systém
LDKR	laserová družicová komunikační rovnice
LKR	laserová komunikační rovnice
Lr	optické ztráty přijímací jednotky
Lt	optické ztráty vysílací jednotky
M	lavinový zisk
Odiv	divergence svazku



```

SNRdB=SNR1dB+1; %dodatečné postupné zhoršení=celkový SNR
Btrkloop=(pi/2)*150; %šířka pásma
NEI=0.3e-12;
Prsdel=1.04e-9 ; %výkon přijatého optického signálu sdělovací linky
Next=5.05; %poměr zhášení fotodetektoru
Trms=(1/(SF*sqrt(SNR1))); %chyba sledování
A=a*0.0253818; %průměr apertury v m
X=9.5;%chyba vlnoplochy
T=lambda/X;
k=2*pi/lambda;
LwfdB=10*log10(exp(-(2*pi/X)^2));%Strehlova ztráta vlnoplochy
G=32/Odiv^2;%celkový efektivní zisk vysílací jednotky
GdB=10*log10(G); %celkový efektivní zisk vysílací jednotky v dB
Tur=4.1e-6;%celková chyba nasměrování
TurdB=2.40;
Rz=6378000; %poloměr Země
h=35758000; %vzdálenost Země-satelit
betaG=120; %úhel mezi dvěma satelity na GEO
Tdakv2=2*q*Idu/M^2+2*q*F*Idm; %šum fotodetektoru za temna
Tpaakv2=(NEI^2)/M^2; %šum předzesilovače
Prlink=100e-12; %předpokládaný výkon optického signálu na fotodetektoru přijímací jednotky
R=sqrt(2*((Rz+h)^2)+2*((Rz+h)^2)*(1-cos(betaG))); %délka spoje
LR=(lambda/(4*pi*R)); %ztráty při šíření volným prostorem
LRdB=20*log10(LR);
Gr=(pi*Daper/lambda)^2; %efektivní zisk přijímací jednotky
GrdB=10*log10(Gr);
LtdB=10*log10(Lt);
PrezdB=3; %min.rezerva přijímací jednotky

```

```
for xn=1:nn
```

```

    Rd(xn)=(n(xn)*q*lambda/(hh*c)); %citlivost detektoru
    Tbakv2(xn)=2*q*F*PB*Rd(xn); %proudová hustota šumu pozadí
    Ttotakv2(xn)=Tbakv2(xn)+Tdakv2+Tpaakv2 %celkový šum
    Ipkakv(xn)=(((2*q*F*B*(1+(1/Ne)*z)/(1-(1-Ne)^2))+sqrt(((2*q*F*B*(1+(1/Ne)*z)/(1-(1-Ne)^2))^2)+((4*Ttotakv2(xn)*B*z)/(1-(1/Ne)^2))))))
    Ppkakv(xn)=(Ipkakv(xn)/Rd(xn)) %požadovaný výkon signálu
    PpkakvdB(xn)=10*log10(Ppkakv(xn));%požadovaný výkon signálu v dB
    Pr(xn)=Ppkakv(xn)+Prez; %Výkon optického signálu na fotodetektoru přijímací jednotky
    PrakvdB(xn)=PpkakvdB(xn)+PrezdB; %výkon optického signálu sdělovací linky
    PtkavdB(xn)=PrakvdB(xn)-(GdB-TurdB+LwfdB+LtdB+LRdB+GrdB+LrdB) %výkon zdroje optického signálu sdělovací linky v dB
end

```

```

%%%%%%%%%%
%PARAMETRY PRO SLEDOVACÍ LINKU
%%%%%%%%%%

```

```

Tpatrk2=((4*(NEI)^2)/M^2); %proudová hustota šumu předzesilovače
Prsdel=1.04e-9 ; %výkon přijatého optického signálu sdělovací linky

```

```
for xn=1:nn
```

```

    Rd(xn)=(n(xn)*q*lambda/(hh*c)); %citlivost detektoru
    Tsssdel2(xn)=q*F*Prsdel*(1+1/Ne)*Rd(xn); %výstřelový šum přijatého signálu sdělovacího kanálu
    Tbsd2(xn)=2*q*F*PB*Rd(xn); %proudová hustota šumu prostředí
    Tdsdel2=2*q*Idu/M^2+2*q*F*Idm; %šum fotodetektoru za temna

```

Ttotrk2(xn)=Tbsdel2(xn)+Tdsdel2+Tpatrk2+Tsssdel2(xn) %celková proudová hustota šumu pro sledovací linku

B=Btrkloop; %šířka pásma přijímaného signálu

Ipktrk(xn)=(2\*q\*F\*B\*(1+1/Next))/((SF\*Trms)^2\*(1-1/Next)^2)+sqrt(((2\*q\*F\*B\*(1+1/Next))/((SF\*Trms)^2\*(1-1/Next)^2))^2+(4\*Ttotrk2(xn)\*B)/((SF\*Trms)^2\*(1-1/Next)^2));

Ppktrk(xn)=(Ipktrk(xn)/Rd(xn)) %požadovaný výkon signálu

PpktrkdB(xn)=10\*log10(Ppktrk(xn));%požadovaný výkon signálu v dB

end

for xn=1:nn

Rd(xn)=(n(xn)\*q\*lambda)/(hh\*c)); %citlivost detektoru

Tsssdel2(xn)=q\*F\*Prsdel\*(1+1/Ne)\*Rd(xn); %výstřelový šum přijatého signálu sdělovacího kanálu

Tbsdel2(xn)=2\*q\*F\*PB\*Rd(xn); %proudová hustota šumu prostředí

Tdsdel2=2\*q\*Idu/M^2+2\*q\*F\*Idm; %šum fotodetektoru za temna

Ttotrk2(xn)=Tbsdel2(xn)+Tdsdel2+Tpatrk2+Tsssdel2(xn) %celková proudová hustota šumu pro sledovací linku

B=Btrkloop; %šířka pásma přijímaného signálu

Ipktrk(xn)=(2\*q\*F\*B\*(1+1/Next))/((SF\*Trms)^2\*(1-1/Next)^2)+sqrt(((2\*q\*F\*B\*(1+1/Next))/((SF\*Trms)^2\*(1-1/Next)^2))^2+(4\*Ttotrk2(xn)\*B)/((SF\*Trms)^2\*(1-1/Next)^2));

Ppktrk(xn)=(Ipktrk(xn)/Rd(xn)) %požadovaný výkon signálu

PpktrkdB(xn)=10\*log10(Ppktrk(xn));%požadovaný výkon signálu v dB

Pr(xn)=Ppktrk(xn)+Prez; %Výkon optického signálu na fotodetektoru přijímací jednotky

PrtrkdB(xn)=PpktrkdB(xn)+PrezdB; %výkon optického výkon signálu sdělovací linky

PptrkdB(xn)=PrtrkdB(xn)-(GdB-TurdB+LwfdB+LtdB+LRdB+GrdB+LrdB) %výkon zdroje optického signálu sdělovací linky v dB

end

%%%%%%%%%

%PARAMETRY PRO SDĚLOVACÍ LINKU

%%%%%%%%%

for xn=1:nn

Rd(xn)=(n(xn)\*q\*lambda)/(hh\*c)); %citlivost detektoru

Tbsdel2(xn)=2\*q\*F\*PB\*Rd(xn); %proudová hustota šumu prostředí

Tpsdel2=(NEI^2)/M^2; %šum předzesilovače

Prlink=100e-12; %předpokládaný výkon optického signálu na fotodetektoru přijímací jednotky

Tsstrk2(xn)=2\*q\*F\*Rd(xn)\*Prlink %příspěvní výstřelového šumu

Ttotsdel2(xn)=Tbsdel2(xn)+Tdsdel2+Tpsdel2+Tsstrk2(xn) %celková proudová hustota šumu sdělovací linky

Ipksdel(xn)=(((2\*q\*F\*B\*(1+(1/Ne)\*z)/(1-(1-Ne)^2)))+(sqrt(((2\*q\*F\*B\*(1+(1/Ne)\*z)/(1-(1-Ne)^2))^2+(4\*Ttotsdel2(xn)\*B\*z)/(1-(1/Ne)^2))))))

Ppksdel(xn)=(Ipksdel(xn)/Rd(xn)) %požadovaný výkon signálu

PpksdeldB(xn)=10\*log10(Ppksdel(xn));%požadovaný výkon signálu v dB

end

for xn=1:nn

Rd(xn)=(n(xn)\*q\*lambda)/(hh\*c)); %citlivost detektoru

Tbsdel2(xn)=2\*q\*F\*PB\*Rd(xn); %proudová hustota šumu prostředí

Tpsdel2=(NEI^2)/M^2; %šum předzesilovače

Prlink=100e-12; %předpokládaný výkon optického signálu na fotodetektoru přijímací jednotky

Tsstrk2(xn)=2\*q\*F\*Rd(xn)\*Prlink %příspěvní výstřelového šumu

Ttotsdel2(xn)=Tbsdel2(xn)+Tdsdel2+Tpsdel2+Tsstrk2(xn) %celková proudová hustota šumu sdělovací linky

```

Ipksdel(xn)=(((2*q*F*B*(1+(1/Ne)*z)/(1-(1-Ne)^2)))+(sqrt(((2*q*F*B*(1+(1/Ne)*z)/(1-(1-Ne)^2)^2)+((4*Totsdel2(xn)*B*z)/(1-(1/Ne)^2))))))
Ppksdel(xn)=(Ipksdel(xn)/Rd(xn)) %požadovaný výkon signálu
PpksdeldB(xn)=10*log10(Ppksdel(xn));%požadovaný výkon signálu v dB
Pr(xn)=Ppksdel(xn)+Prez; % Výkon optického signálu na fotodetektoru přijímací jednotky
PrsdeldB(xn)=PpksdeldB(xn)+PrezdB; % výkon optického výkon signálu sdělovací linky
PtsdeldB(xn)=PrsdeldB(xn)-(GdB-TurdB+LwfdB+LtdB+LRdB+GrdB+LrdB) % výkon zdroje
optického signálu sdělovací linky v dB
end

```

```
end
```

```

%%%%%%%%%%
%ZTRÁTY VOLNÝM PROSTOREM
%%%%%%%%%%

```

```

a=5.5;%(v in) průměr apertury
bbeta=[60:30:120]; %pro GEO
nbbeta=size(bbeta,2);
Rz=6378000; %poloměr Země
h=35758000; %vzdálenost Země-satelit

```

```

for y=1:nbbeta
    Rkk(y)=sqrt(2*(Rz+h)^2+2*(Rz+h)^2*(1-cos(beta(y))));
    LRk(y)=(lambda/(4*pi*Rkk(y)))^2;
    LRkdB(y)=10*log(LRk(y));
    PPrsdeldkB=-89.81; % výkon optického výkon signálu sdělovací linky
    PtsdelkB(y)=-89.81-(GdB-TurdB+LwfdB+LtdB+LRkdB(y)+GrdB+LrdB); % výkon zdroje
optického signálu sdělovací linky v dB
    PPrtrkkdB=-98.62;
    PptrkkdB(y)=-98.62-(GdB-TurdB+LwfdB+LtdB+LRkdB(y)+GrdB+LrdB); % výkon zdroje
optického signálu sdělovací linky v dB
    PPrakvkdB=-110.36;
    PtkvkdB(y)=-110.36-(GdB-TurdB+LwfdB+LtdB+LRkdB(y)+GrdB+LrdB); % výkon zdroje
optického signálu sdělovací linky v dB
end

```

```
return
```

```

%=====
% procedura vykreslení
%=====

```

```

elseif strcmp(cinnost1,'Graf1'),
    HndlList=get(gcf,'Userdata');
    hGraf1=HndlList(2);
    Graf1=HndlList(9);
    axes(hGraf1)
    plot(n,Ppksdel)
    hold on
    plot(n,Ppktrk,'g')
    hold on
    plot(n,Ppkakv,'r')
    hold on

```

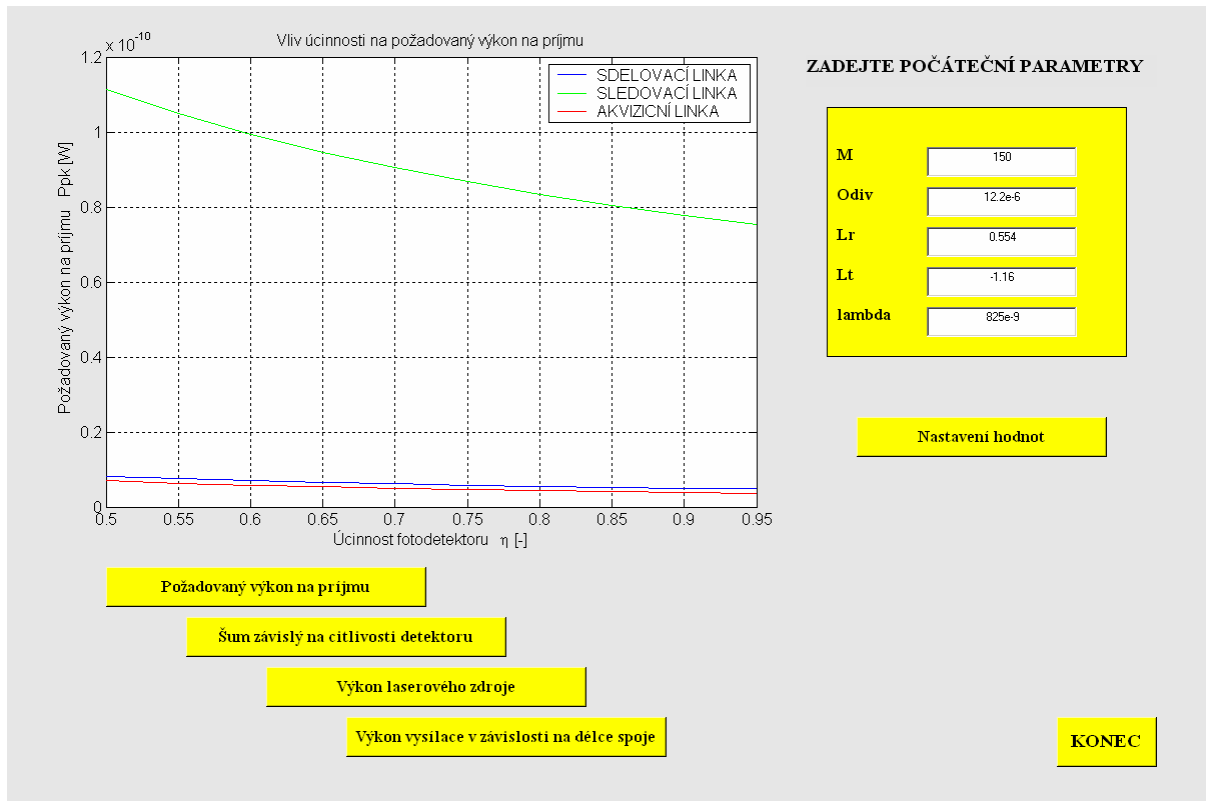
```

zoom on
title('Vliv účinnosti na požadovaný výkon na příjmu')
xlabel('Účinnost fotodetektoru \eta [-]')
ylabel('Požadovaný výkon na příjmu Ppk [W]')
legend('SDELOVACÍ LINKA','SLEDOVACÍ LINKA','AKVIZICNÍ LINKA')
grid on
zoom on
hold off
return

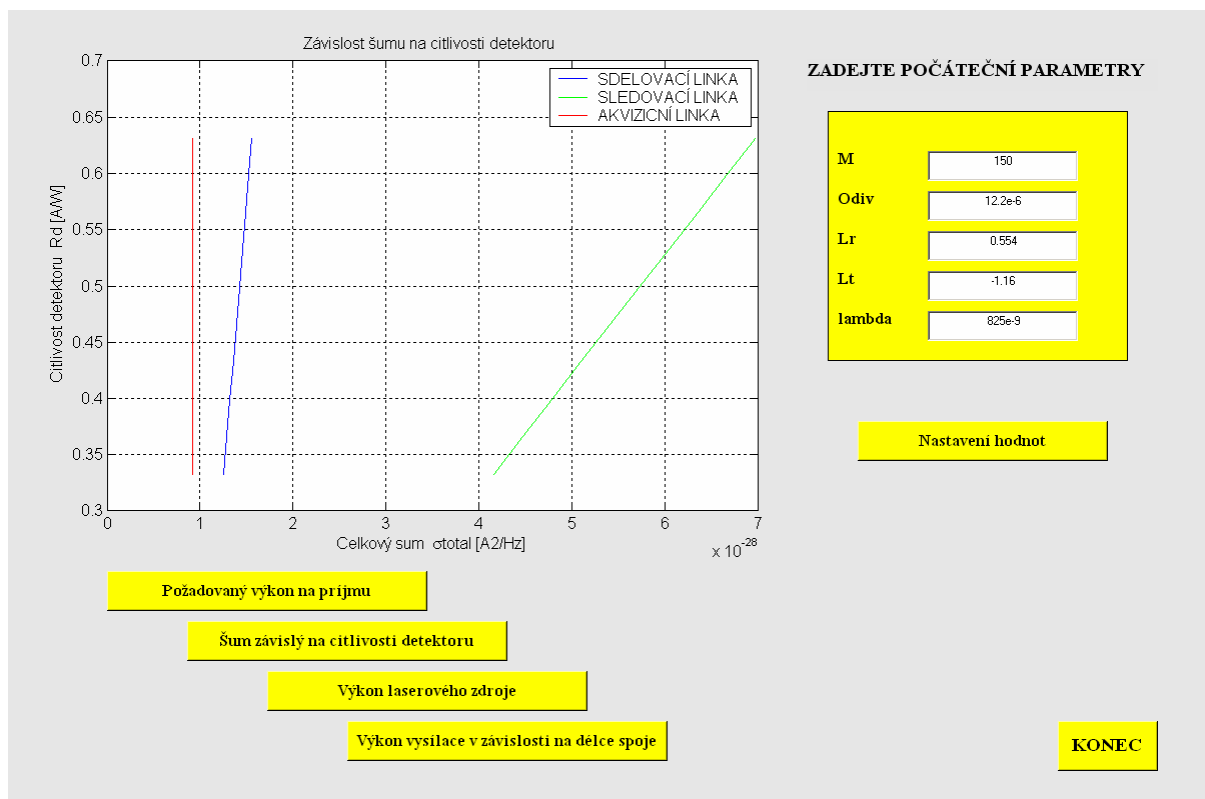
elseif strcmp(cinnost1,'Graf2'),
    HndlList=get(gcf,'Userdata');
    hGraf1=HndlList(2);
    Graf2=HndlList(10);
    axes(hGraf1)
    plot(Ttotsdel2,Rd)
    hold on
    plot(Ttottrk2,Rd,'g')
    hold on
    plot(Ttotakv2,Rd,'r')
    hold on
    zoom on
    title('Závislost šumu na citlivosti detektoru ')
    xlabel('Celkový šum \sigmatotal [A2/Hz]')
    ylabel('Citlivost detektoru Rd [A/W]')
    legend('SDELOVACÍ LINKA','SLEDOVACÍ LINKA','AKVIZICNÍ LINKA')
    grid on
    zoom on
    hold off
return

```

## Vybrané výsledky z počítačové podpory optimalizace návrhu LDKS



Obrázek 2.1 Vykreslení závislosti požadovaného výkonu na vstupu přijímací jednotky na účinnosti fotodetektoru LDKS. Rozdílnými barvami jsou průběhy vykresleny pro sdělovací, sledovací a akviziční linku.



Obrázek 2.2 Vykreslení závislosti celkové spektrální výkonové hustoty šumu na citlivosti detektorů LDKS. Rozdílnými barvami jsou průběhy vykresleny pro sdělovací, sledovací a akviziční linku.



### 3 Závěr

V příspěvku byly uvedeny vybrané výsledky aplikace programového prostředí MATLAB pro potřeby vysoce efektivní analýzy a optimalizace LDKS jejíž komplexní výsledky jsou předmětem výzkumné zprávy vypracované v rámci studentské tvůrčí aktivity.

#### Literatura:

- [1] Mazáková, M.- Titl, M.: Analýza a optimalizace koncepce laserového družicového komunikačního systému.  
Výzkumná zpráva. Univerzita obrany Brno, 2005.

E-mail a telefon: [Marketa.Mazalkova@unob.cz](mailto:Marketa.Mazalkova@unob.cz)

973 444 814

[Miroslav.Titl@vabo.cz](mailto:Miroslav.Titl@vabo.cz)

973 444 801

Poštovní adresa: Markéta Mazáková  
Univerzita obrany  
Kounicova 65  
612 00 BRNO