

Енергийно оразмеряване на радиоканал

Връзка между разстояние, мощност на предавателя, характеристики на антените, чувствителността на приемника и др.

Енергийно оразмеряване на радиоканал

(На английски се използва краткият, ясен и ненаучен термин “Link budget”)

Равносметка, включваща всички усилвания и загуби на енергия от изхода на предавателя, през средата за разпространение, до входа на приемника.

Обикновено се прави с използване а **децибели** → следва инструктаж за придобиване на първа квалификационна група по работа с децибели.

Децибели - Що е то?

Велл – логаритмична единица за отношението между две
МОЩНОСТИ.

$$(P_1/P_2)_{[В]} = \log_{10}(P_1/P_2)$$

1 В е доста → използва се децибел (dB).

$$(P_1/P_2)_{[dB]} = 10 (P_1/P_2)_{[В]} = 10 \log_{10}(P_1/P_2)$$

(Внимание! $P_1/P_2 = 1 \rightarrow (P_1/P_2)_{[dB]} = 0 !$)

Децибелы: нива в dB

Ниво на сигнал в dB:

$$\left(\frac{\text{Мощност на сигнала}}{\text{Еталонна мощност}} \right)_{[dB]}$$

Според еталонната мощност:

• $1W \rightarrow \text{dBW}; P_{[dBW]} = 10 \lg(P/1W) = 10 \lg(P_{[W]})$

• **$1 \text{ mW} \rightarrow \text{dBm}$**

$$P_{[dBm]} = 10 \lg(P_{[mW]}) = 10 \lg(1000 P_{[W]}) = P_{[dBW]} + 30$$

М. М.: “Колко е 0 dBm? Има нещо, или нема нищо?”

Децибели: полза

- Умножение → събиране
- Деление → изваждане
- $x^N \rightarrow Nx_{[dB]}$
- Промяна с 1 dB съответства на промяна на P с 25%, → обикновено работим с най-много един знак след десетичната точка и **относителната точност е постоянна и достатъчна**. *(Ако при «нормални единици» (не децибели) работим с точност един разряд след запетаята, това ще е прекалено грубо при мощности от порядъка на части от W ; ще добре, ако мощността е десетки W и ще е маниащина ако е 10000 W)*
- Скала от неколкостотин dB обхваща почти всичко.
- Акустика - субективното възприятие за сила и височина на звука е логаритмично

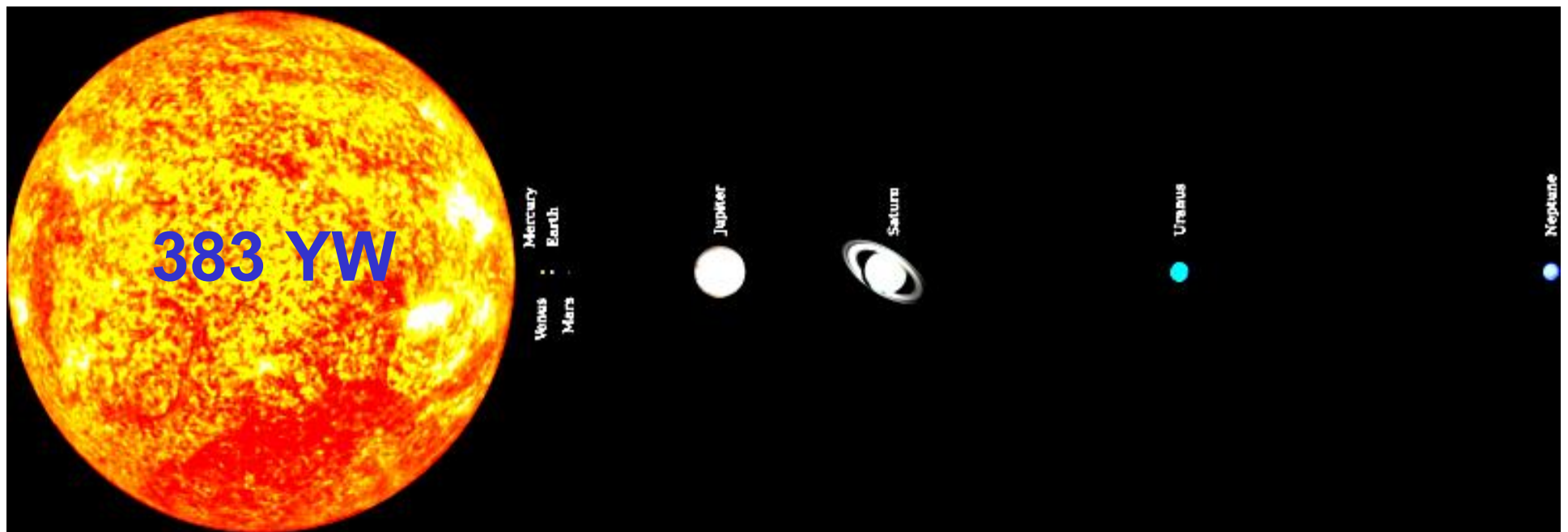
Децибелы: Задача 1

Студент от ФТК правил курсов проект и изчислил ниво на изхода на един усилвател 300 dBm.

Нищо особено, казал си той и продължил изчисленията.

Това не е ли прекалена скромност?

300 dBm \rightarrow 1 mW $\times 10^{300/10} = 10^{30}$ mW = 1000 YW (йотавата)



Децибели: Задача 2

Един предавател има мощност 27 dBm.

Колко вата е мощността му?

Свеждаме към сума/разлика от децибели, чиито съответстващи съотношения лесно се пресмятат наум или са “популярни”:

$$27 \text{ dBm} = 30 \text{ dBm} - 3 \text{ dB}$$



$$(1 \text{ mW} \times 10^{30/10}) / (10^{3/10}) = 1000 \text{ mW} / 2 = \underline{0.5 \text{ W}}$$

Вадим от dBm dB!?! Несъгласуваност в мерните единици?

dBm \Leftrightarrow Метри над морското равнище

27 метра н. м. р. е с 3 метра по ниско от 30 метра н. м. р.

$$27 \text{ метра н. м. р.} = 30 \text{ метра н. м. р.} - 3 \text{ метра}$$

Децибели: Задача 3

Един практик искал да изследва сигнал с напрежение 15 V. Видял, че до входа на спектралния анализатор пишело:



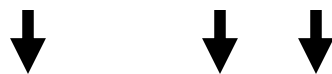
Max 23 dBm

Много важно, рекъл си той и продължил работата си.

Прав ли е бил практикът?

Мощност на сигнала: $P = V^2/R_{in} = 15^2/50 = \underline{4.5 W}$

23 dBm = 20 dBm + 3 dB



$$(1 \text{ mW} \times 10^{20/10}) \times (10^{3/10}) = 100 \text{ mW} \times 2 = 200 \text{ mW} = \underline{0.2 W}$$

Необходими сведения - 1

Чувствителност на приемник – минимално ниво на приемания сигнал, при което...

Обикновено се подразбира така наречената “**реална чувствителност**”: минимално ниво на приетия сигнал, при което приемането е удовлетворително (*например коефициентът на двоична грешка на приетите данни достига максималната си търпима стойност*).

$$P_{R \min}$$

По-добър приемник – по-малко $P_{R \min}$

Необходимими сведения - 1

Какво става, когато мощността на приемания сигнал намалява:

Отношението между мощността на приемания сигнал и мощността на *шума, приведен към входа* на приемника **CNR (carrier to noise ratio)** намалява . Спадне ли под някаква минимално допустима стойност **CNR_{min}**, приемането вече става неудовлетворително.

$$CNR_{\min} = \frac{P_{R\min}}{P_N} \Rightarrow P_{R\min} = CNR_{\min} P_N$$

CNR_{min} зависи от вида и параметрите на модулацията и каналното кодиране, както и от начина на обработка на приетия сигнал.

Необходими сведения - 1

Как да подобрим чувствителността на приемника?

- Чрез **намаляване на CNR_{min}** , например чрез
 - модулация с по-малка кратност
 - шумоустойчиво кодиране
- Чрез **намаляване на P_N** , но възможностите за това са ограничени. Например:
 - използване на елементи с по-малки шумове
 - охлаждане (в крайни случаи)
 - стесняване на пропусканата честотна лента, но...

Необходими сведения - 1

Пресмятане на P_N :

- Обширна тема; за наземни системи – по-нататък
- За спътникови и космически системи – чрез T_e – еквивалентна шумова температура на приемната апаратура:

$$P_N = kT_e B$$

$$P_{N[dBm]} = -198.6 + 10 \lg(T_e) + 10 \lg(B)$$

$k=1.38 \times 10^{-23}$, J/K – константата на Болцман

B – пропускана честотна лента

Необходими сведения - 2

Плътност на потока на енергията: колко енергия преминава за единица време през единица площ, перпендикулярна на посоката на разпространение.

Означение: *PFD* (Power Flux Density)

Дименсия: W/m^2

На разстояние R от **изотропно** излъчващ предавател с мощност P_T ,

$$PFD = \frac{P_T}{4\pi R^2}$$

Необходимими сведения - 3

Ефективна площ на антена A_{eff} : площ (въображаема), перпендикулярна на посоката на разпространение, през която ще премине толкова мощност, колкото би приела разглежданата антена.

Приета мощност:

$$P_R = A_{eff} \cdot PFD$$

Необходимими сведения - 4

Ефективна площ на апертурна антена (напр. огледална, рупорна):

$$A_{eff} = e_a A_{phys}$$

$$e_a = 0.5 \dots 0.8$$

Необходими сведения - 5

Изотропна антена: въображаема теоретична елементарна антена, която излъчва равномерно във всички посоки/приема еднакво добре от всички посоки.

Доказва се, че такава антена не съществува. Тя обаче се използва като “единца мярка” за антена.

Ефективна площ на изотропна антена:

$$A_i = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Участието на дължината на вълната може да изглежда може да изглежда странно. Интуитивно обяснение: За по-големи дължини на вълната съответните елементарни антени имат по-големи физически размери. Логично е такива антени да “прихващат” енергия от по-голяма площ.

Необходими сведения - 6

Коефициент на усилване на антена



Как така усилване без захранване?!

Ако антената на предавател има **насочено действие**, интензитетът на излъчване (мощност в единица пространствен ъгъл) в определени посоки ще надвишава този, който би се получил при същата мощност на предавателя с използване на изотропна антена.

При дадена PFD насочената антена ще приеме по-висока мощност от ненасочена антена (факт).

Необходими сведения - 7

Коефициент на усилване на антена

Означение: ***G*** (от “gain”-печалба)

Показва колко пъти интензитетът на излъчване (в посоката на максимално излъчване) ще е по-висок от този на еталонна антена при фиксирана мощност на предавателя.

Или: Колко пъти приетата мощност ще е по-висока от тази на еталонна антена при дадена PFD.

G е една и съща и за предаване, и за приемане.

Необходими сведения - 8

Коефициент на усилване на антена

Най-често се измерва в

dBi

еталон е **изотропната** антена;

dBd – ако еталон е диполна антена

Необходими сведения - 9

Коефициент на усилване на антена с кръгла апертура:

$$G_{[dBi]} = \left[e_a \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \right]_{[dB]} = 10 \lg \left[e_a \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \right]$$

d – диаметър на апертурата

$$e_a = 0.5 \dots 0.8$$

Може да се изведе от предишните слайдове:

$$G = \frac{P_R}{R_{Ri}} = \frac{PFD \cdot A}{PFD \cdot A_i} = \frac{A}{A_i} = \frac{e_a \pi d^2 / 4}{\lambda^2 / (4\pi)} = \frac{e_a \pi^2 d^2}{\lambda^2} = e_a \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2$$

Link Budget

Сглобяване на сметката

При работа с изотропни антени:

$$P_R = A_{eff} \cdot PFD = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{P_T}{4\pi R^2} = \frac{P_T}{(4\pi R/\lambda)^2} = \frac{P_T}{L_P}$$

$$L_P = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 - \text{Path Loss} - \text{Загуби при разпространение}$$

Тези загуби **не** произтичат от поглъщане на енергия от въздуха, а отчитат “разпръскването” на енергията в пространството.

Link Budget

При изразяване на величините в децибели:

$$P_R = P_T - L_P$$

$$L_P = -147.56 + 20 \log(f_{[Hz]}) + 20 \log(R_{[m]})$$

$$L_P = 32.44 + 20 \log(f_{[MHz]}) + 20 \log(R_{[km]})$$

Link Budget

При работа с реални (не изотропни) антени:

$$P_R = P_T + G_T - L_P + G_R$$

$$P_R = EIRP - L_P + G_R,$$

$$\text{където } EIRP = P_T + G_T$$

EIRP - еквивалентна изотропно излъчена мощност
(Equivalent Isotropic Radiated Power)

EIRP е мощността, която би се наложило да излъчва предавателят, ако използваше изотропна антена, за да създаде същото PFD в точката на приемане.

Link Budget

Още за загубите:

Разгледахме разпространение в свободно пространство.
За различни местности си има модели.

Има и различни допълнителни загуби, които често пъти трябва да се отчитат при по-сериозно проектиране.

Повече за загубите – ако стане дума на лекциите.

Link Budget

Относно максималното разстояние

$$\begin{aligned}P_{R \min} &= P_T + G_T - L_{\max} + G_R \\ &= P_T + G_T - L(R_{\max}) + G_R\end{aligned}$$

$L_{\max} = L(R_{\max})$ - максимално допустими загуби

$$L(R_{\max}) = P_T + G_T + G_R - P_{R \min}$$

От $L(R_{\max})$ можем да намерим R_{\max} .

Следствия...

Link Budget

За да направим някои практически изводи е добре да работим с линейни единици (“не-децибелни”):

$$L_P = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \Rightarrow R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{L_P}$$

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{L_{\max}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_T G_T G_R}{\text{CNR}_{\min} P_N}}$$

Следствия: ...

Задача 1: Спътникова TV

Дадено:

- EIRP=50 dBW
- $f=12$ GHz
- $R=38\ 000$ km
- $d_R=60$ cm (диаметър на приемната антена)
- $B=36$ MHz (честотна лента)
- $C/N_{\min}=6.6$ dB (мин. отн. носещо трептение/шум)
- $T_A=60$ K (шумова температура на антената)
- $T_R=70$ K (шумова температура на приемника)

Ще бъде ли възможно приемането?

Задача 1: Спътникова TV

Дадено: EIRP=50 dBW; $f=12$ GHz; $R=38\ 000$ km; $d_R=60$ cm; $B=36$ MHz; $C/N_{\min}=6.6$ dB;
 $T_A=60$ K; $T_R=70$ K

Коефициент на усилване на приемната антена:

$$G_R = 10 \cdot \log \left[e_a \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \right] =$$
$$= 10 \cdot \log \left[0.6 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0.6}{3 \cdot 10^8 / 12 \cdot 10^9} \right)^2 \right] \approx 35 \text{ dB}$$

Задача 1: Спътникова TV

Дадено: EIRP=50 dBW; $f=12$ GHz; $R=38\ 000$ km; $d_R=60$ cm; $B=36$ MHz; $C/N_{\min}=6.6$ dB;
 $T_A=60$ K; $T_R=70$ K

Загуби при разпространението:

$$\begin{aligned} L_P &= 32.44 + 20\log(f_{[MHz]}) + 20\log(R_{[km]}) = \\ &= 32.44 + 20\log(12000) + 20\log(38000) = 206 \text{ dB} \end{aligned}$$

Задача 1: Спътникова TV

Дадено: $EIRP=50$ dBW; $f=12$ GHz; $R=38\ 000$ km; $d_R=60$ cm; $B=36$ MHz; $C/N_{\min}=6.6$ dB;
 $T_A=60$ K; $T_R=70$ K

Знаем още:

$G_R=35$ dB; $L_P=206$ dB

Търсим нивото на приетия сигнал:

Еквивалентна изотропно излъчена мощност:

$$EIRP_{[dBm]} = EIRP_{[dBW]} + 30 = 50 + 30 = 80 \text{ dBm}$$

Ниво на приетия сигнал:

$$P_R = EIRP_{[dBm]} - L_P + G_R = 80 - 206 + 35 = -91 \text{ dBm}$$

Задача 1: Спътникова TV

Дадено: EIRP=50 dBW; $f=12$ GHz; $R=38\,000$ km; $d_R=60$ cm; $B=36$ MHz; $C/N_{\min}=6.6$ dB;
 $T_A=60$ K; $T_R=70$ K

Знаем още:

$G_R=35$ dB; $L_P=206$ dB; $P_R=-91$ dBm

Ниво на шума:

- Еквивалентна шумова T на системата:

$$T_{sys} \approx T_A + T_R = 60 + 70 = 130\text{K}$$

- Ниво на шума:

$$P_{N[dBm]} = -198.6 + 10\log(T_{sys}) + 10\log(B) \approx -102\text{dBm}$$

Задача 1: Спътникова TV

Дадено: EIRP=50 dBW; $f=12$ GHz; $R=38\,000$ km; $d_R=60$ cm; $B=36$ MHz; $C/N_{\min}=6.6$ dB;
 $T_A=60$ K, $T_R=70$ K

Знаем още:

$G_R=35$ dB; $L_P=206$ dB; $P_R=-91$ dBm; $P_N=-103$ dBm

Отношение “носецо трептение/шум:

$$C / N = -91 - (-102) = 11 \text{ dB} > 6.6 \text{ dB}$$

Имаме приблизително 5 dB запас.

(Ако не съм сбъркал някъде в сметките. Проверете за домашно.)

Забележка: Данните, използвани за тези изчисления са ориентировъчни. Изчисленията са опростени и не включват допълнителни загуби и т. н. Целта е запознаване с принципите на енергийното измеряване и с порядъците на участващите величини.

Задача 1: Спътникова TV

Коефициент на качество (figure of merit) на приемната апаратура **G/T**:

$$\begin{aligned} C / N &= P_R - P_N = EIRP - L_P + G_{R[dB]} + 198.6 - 10 \lg T_{sys} - 10 \lg B = \\ &= EIRP - L_P + 198.6 - 10 \lg B + 10 \lg \left(G_R / T_{sys} \right) = \\ &= EIRP - L_P + 198.6 - 10 \lg B + G / T \end{aligned}$$

- Само G/T зависи от приемната апаратура. Всичко друго е дадено.
- Може някой да се хвали, че антената му е с голямо усилване, но то да е постигнато чрез прекалено пълно използване на площта на рефлектора → повишаване на страничните листа на ДНД → приемане на шум от тях → повишена T_A (ключова дума: spillover). Който иска да се хвали, нека се хвали с голямо G/T.

Задача 2: Voyager - Земя

Дадено:

- $P_T = 18 \text{ W}$
- $f = 8.4 \text{ GHz}$
- $d_T = 3.7 \text{ m}$
- $d_R = 70 \text{ m}$
- $T_e = 21 \text{ K}$
- $R \approx 20 \times 10^9 \text{ km}$ (44 години се отдалечава от Земята)

Търсим: скорост на предаване
+ поучителни факти



Задача 2: Voyager - Земя

Дадено:

$P_T=18$ W; $f=8.4$ GHz; $d_T=3.7$ m; $d_R=70$ m; $T_e=21$ K; $R=20 \times 10^9$ km

Коефициенти на усилване на антените

$$G_T = 10 \cdot \log \left[e_a \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \right] = 10 \cdot \log \left[0.8 \left(\frac{\pi \cdot 3.7}{3 \cdot 10^8 / 8.4 \cdot 10^9} \right)^2 \right] = 49 \text{ dB}$$

$$G_R = 10 \cdot \log \left[e_a \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \right] = 10 \cdot \log \left[0.8 \left(\frac{\pi \cdot 70}{3 \cdot 10^8 / 8.4 \cdot 10^9} \right)^2 \right] = 75 \text{ dB}$$

Задача 2: Voyager - Земя

Дадено:

$P_T=18$ W; $f=8.4$ GHz; $d_T=3.7$ m; $d_R=70$ m; $T_e=21$ K; $R=20 \times 10^9$ km

Загуби при разпространение:

$$L_P = 32.44 + 20 \log(f_{[MHz]}) + 20 \log(R_{[km]})$$

$$\begin{aligned} L_P &= 32.44 + 20 \log(8400) + 20 \log(20 \cdot 10^9) = \\ &= 317 \text{ dB} \end{aligned}$$

(Един от малкото случаи, в които верен отговор надхвърля 300 dB)

Задача 2: Voyager - Земя

Дадено:

$P_T=18\text{ W}$; $f=8.4\text{ GHz}$; $d_T=3.7\text{ m}$; $d_R=70\text{ m}$; $T_e=21\text{ K}$; $R=20 \times 10^9\text{ km}$

Знаем още: $G_T=49\text{ dB}$; $G_R=75\text{ dB}$; $L_P=317\text{ dB}$

Приета мощност:

$$\begin{aligned} P_R &= P_T + G_T - L_P + G_R = \\ &= 10 \log(18 \times 10^3\text{ mW}) + 49 - 317 + 75 = \\ &= -150\text{ dBm} \end{aligned}$$

(Например 7 nV върху 50Ω, ако напреженията Ви говорят повече)

Задача 2: Voyager - Земя

Дадено:

$P_T=18$ W; $f=8.4$ GHz; $d_T=3.7$ m; $d_R=70$ m; $T_e=21$ K; $R=20 \times 10^9$ km

Знаем още: $P_R=-150$ dBm

Ниво на шума:

$$\begin{aligned} P_N[dBm] &= -198.6 + 10\log(T_e) + 10\log(B) = \\ &= -185 + 10\log(B) \end{aligned}$$

Задача 2: Voyager - Земя

Дадено:

$P_T=18$ W; $f=8.4$ GHz; $d_T=3.7$ m; $d_R=70$ m; $T_e=21$ K; $R=20 \times 10^9$ km

Знаем още: $P_R=-150$ dBm

Отношение “носецо трептение/шум”:

$$\begin{aligned}CNR_{[dB]} &= P_S - P_N = \\ &= -150 + 185 - 10\log(B) = 35 - 10\log(B)\end{aligned}$$

Тук вече е добре да минем от dB в “пъти”:

$$CNR = \frac{10^{35/10}}{B} = \frac{3160}{B}$$

Задача 2: Voyager - Земя

Каква скорост на предаване можем да постигнем?

Теорема на Shannon:

$$C = B \log_2 (1 + SNR)$$

(Внимание! Тук SNR е в "пъти".)

- C е **максималната скорост** на предаване, при която *има начин* вероятността за грешка при приемане да се направи произволно малка.
- Обратно, опитаме ли се да предаваме със скорост по-голяма от C , вероятността за грешки ще е близка до 1.

Теоремата е валидна за бял гаусов шум, но на практика това не е голямо ограничение.

Задача 2: Voyager - Земя

Каква скорост на предаване можем да постигнем?

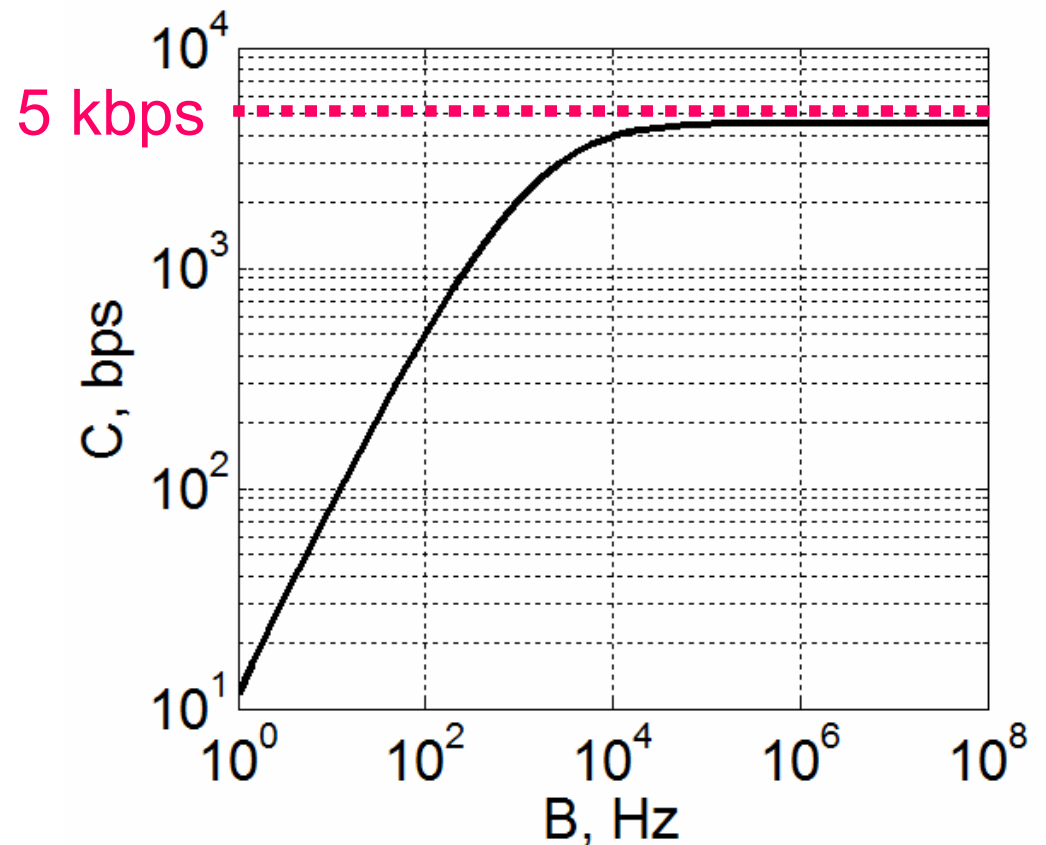
Намерихме:

$$SNR = 3160/B$$

Оттук:

$$\begin{aligned} C &= B \log_2(1 + SNR) = \\ &= B \log_2(1 + 3160/B) \end{aligned}$$

Графика на тази
функция – вдясно



Задача 2: Voyager - Земя

!? От определено B нагоре,
каналният капацитет не зависи от B .

$$\log_2(x) = \ln(x) / \ln(2) \approx 1.44 \ln(x)$$

$$C = B \cdot 1.44 \ln(1 + SNR)$$

$$\ln(1 + x) \approx x \text{ при } x \ll 1$$

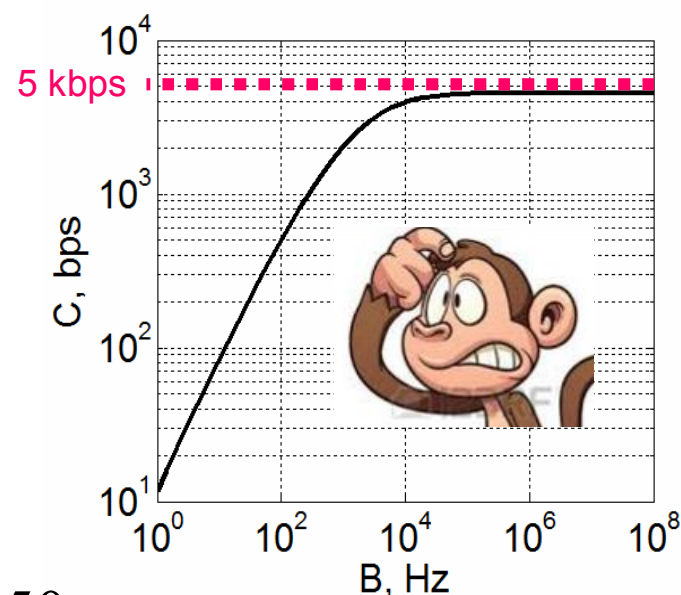
При нас $SNR = 3160 / B$.

При $B \gg 3160$ $SNR \ll 1$. Тогава :

$$C \approx B \cdot 1.44 \cdot SNR = \cancel{B} \cdot 1.44 \cdot 3160 / \cancel{B} = 4550$$

Май няма полза от разширяване на B ?

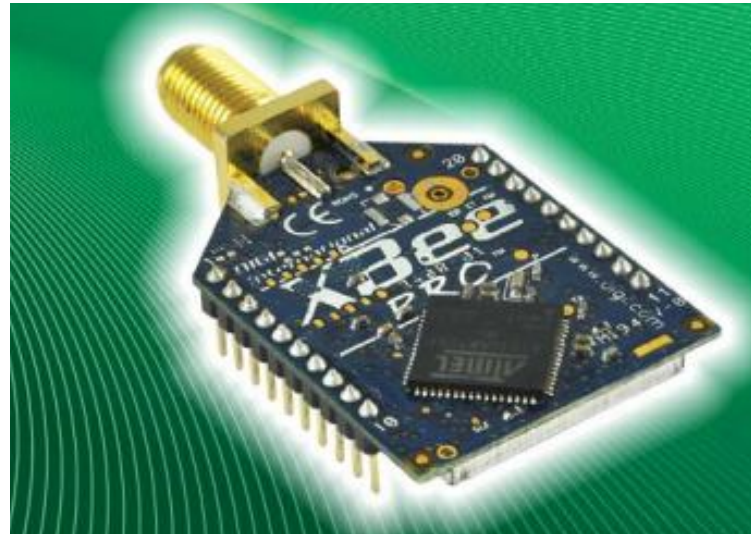
Не! Има полза: Сигналят става по-устойчив спрямо теснолентови смущения.



Задача 3: XBee

Дадено:

- $P_T = 300 \text{ mW}$
- $P_{Rmin} = -112 \text{ dBm}$
- $f = 868 \text{ MHz}$
- $G_T = G_R = 2.15 \text{ dBi}$
- Търсим R_{max} за свободно разпространение



Задача 3: XВee

Дадено:

$P_T=300$ mW; $P_{Rmin}=-112$ dBm; $f=868$ MHz; $G_T=G_R=2.15$ dBi

Търсим максимално допустимите загуби при разпространение:

$$P_{Rmin} = P_T + G_T - L_{Pmax} + G_R$$

$$\begin{aligned} L_{Pmax} &= P_T + G_T + G_R - P_{Rmin} = \\ &= 10\log(300) + 2.15 + 2.15 - (-112) = 141 \text{ dB} \end{aligned}$$

Задача 3: XВee

Дадено:

$P_T=300$ mW; $P_{Rmin}=-112$ dBm; $f=868$ MHz; $G_T=G_R=2.15$ dBi

Знаем още:

$L_{P\ max}=141$ dB

Търсим максималното разстояние :

$$L_{P\ max} = 32.44 + 20\log(f_{[MHz]}) + 20\log(R_{max}[km])$$

Оттук:

$$20\log(R_{max}[km]) = L_{P\ max} - 32.44 - 20\log(f_{[MHz]})$$

Задача 3: XВee

Дадено:

$P_T=300$ mW; $P_{Rmin}=-112$ dBm; $f=868$ MHz; $G_T=G_R=2.15$ dBi

Знаем още:

$L_{P\ max}=141$ dB

Търсим максималното разстояние :

$$\begin{aligned} R_{\max}[km] &= 10^{\frac{L_{P\ \max} - 32.44 - 20 \log(f_{[MHz]})}{20}} = \\ &= 10^{\frac{L_{P\ \max} - 32.44 - 20 \log(868)}{20}} = \frac{10^{\frac{L_{P\ \max}}{20}}}{36350} \end{aligned}$$

Задача 3: XВee

Дадено:

$P_T=300 \text{ mW}$; $P_{Rmin}=-112 \text{ dBm}$; $f=868 \text{ MHz}$; $G_T=G_R=2.15 \text{ dBi}$

Знаем още:

$L_{P \text{ max}}=141 \text{ dB}$

Търсим максималното разстояние :

$$R_{\text{max}}[km] = \frac{10^{\frac{L_{P \text{ max}}}{20}}}{36350}$$

Забележка: Все пак това са доста груби сметки.

$L_{P \text{ max}}=141 \text{ dB}$ (без запас) (или при $G_T=G_R=12 \text{ dBi}^*$ и запас 20 dB) *Ако е разрешено	$L_{P \text{ max}}=120 \text{ dB}$ (запас 21 dB)	$L_{P \text{ max}}=141 \text{ dB}$ +липса на пряка ВИДИМОСТ, $n=4$ (n - path loss exponent; в общ случай $L_p=\dots+10n\lg(R)$)
309 km	28 km	17.5 km (и 5.2 km при запас 21 dB)

