

## 4. Комуникациони модел

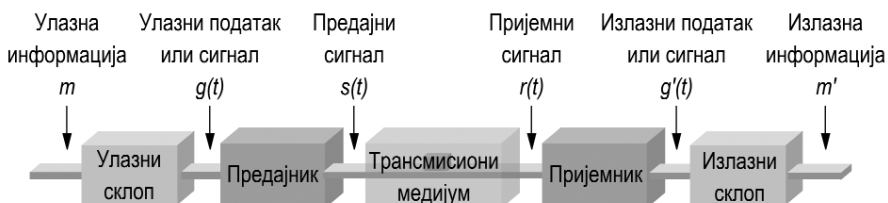
Блок дијаграм једноставног комуникационог модела дат је на слици 4.1. Основна намена преноса података је да пренеси поруке између два корисника. На слици информација коју треба пренети садржана је у поруци означеној са  $m$ . Ова порука, која се преноси као податак, генерално је представљена предајнику као сигнал променљив у времену  $g(t)$ .

Појмови податак и информација често се користе и могу се дефинисати на следећи начин:

- податак је репрезентација чињеница, концепта или инструкција форматизованих на начин погодан за комуникацију и интерпретацију, обрађена од стране човека или неког средства за аутоматску обраду,
- информација је значење које човек додељује подацима преко конвенција које примењује на те податке.

Ове дефиниције могу да буду академске, али за ову намену може им се дати следећа интерпретација: подаци могу да буду идентификовани, подаци се могу описати; подаци не морају да представљају нешто физичко у смислу нечега што се може измерити. Али подаци могу и треба да се користе за стварање информација. Подаци за једну особу су информација за другу. Информација се стиче када се подаци интерпретирају. Да би се пренела информација потребан је приступ елементима података и могућност да се пренесу.

Вратимо се на слику 4.1; потребно је пренети сигнал  $g(t)$ . Ако сигнал није у форми погодној за пренос и он мора бити претворен (конвертован) у сигнал  $s(t)$  који је прилагођен карактеристикама трансмисионог медијума. Сигнал се, затим, преноси преко медијума. Друга страна прима сигнал  $r(t)$ , који због оштећења при преносу сигнала може да се разликује од  $s(t)$ . Овај сигнал пријемник конвертује у форму погодну за излаз. Конвертовани (претворени) сигнал  $g'(t)$  је апроксимација (процена) улазног сигнала  $g(t)$ . На крају, излазни модул предаје процењену поруку  $m'$  одредишном кориснику. На слици 4.1 представљен је један смер везе, а исти модел се користи за други смер када је веза двосмерна. У том случају на обе стране комуникационог система налазе се примопредајници (модеми), односно улазно/излазни (У/И) склопови.



Слика 4.1 Комуникациони модел

Представићемо овај пример на коришћењу електронске поште. Претпоставимо да су улазни склоп и предајник компоненте персоналног рачунара. Корисник жели да пошаље поруку другом кориснику, на пример; „Почетак наставе је 16. фебруара.” ( $m$ ). Овај низ карактера садржи информацију. Корисник активира електронску пошту на персоналном рачунару и уноси поруку преко тастатуре (улазни склоп). Низ карактера (симбола) спакован је у меморију. Поруку можемо видети као секвенцу карактера  $g$  или као низ (секвенцу) битова ( $g$ ) у меморији. Рачунар је везан за неки трансмисиони медијум, као што је телефонска линија или локална рачунарска мрежа преко У/И склопа као што је примопредајник локалне мреже или модем. Улазни подаци преносе се ка предајнику као секвенца битова (низ „0” и „1”)  $g(t)$ , или као низ напонских (струјних) промена  $g(t)$  кроз неку комуникациону магистралу или кабл. Предајник је прикључен директно на медијум и претвара долазеће битове у сигнал  $s(t)$  погодан за пренос.

Предајни сигнал  $s(t)$  упућен на средину за пренос предмет је деловања бројних изобличења и сметњи пре него што дође до пријемника. Због тога примљени сигнал  $r(t)$  може да се разликује од  $s(t)$ . Пријемник може да процени природу  $s(t)$  засновану на  $r(t)$  и свом познавању медијума производећи секвенцу битова  $g'(t)$ . Битови се шаљу излазном рачунару и смештају у меморију као блок битова или карактера  $g'(t)$ . Одредишни систем покушаће да одреди да ли се појавила грешка. Ако се то деси сарађиваће са предајним системом да би евентуално добио комплетан, без грешке, блок података. Ове податке корисник може да прегледа преко неког од излазних уређаја као што је на пример монитор или штампач. Порука коју корисник може да прегледа ( $m'$ ) није потпуно идентична са послатом поруком  $m$ . У неким применама<sup>1</sup> то је довољно за успешан пренос. У другим применама<sup>2</sup> пренос се обавља док се не добије идентична порука.

#### 4.1 Пренос података

Успешан пренос података зависи у принципу од два фактора:

- квалитета сигнала који се преноси,
- карактеристика трансмисионог медијума.

##### Концепт и терминологија

Пренос података обавља се између предајника и пријемника преко трансмисионог медијума. Трансмисиони медијум може да буде жични<sup>3</sup> и бежични<sup>4</sup>. Жични медијум физички повезује крајње станице. Пример су упредена телефонска парица, коаксијални каблови и оптичка влакна. Са бежичним медијумом крајње станице нису физички повезане већ се сигнали преносе кроз нпр. ваздух, вакуум и море.

Термин директна веза (линк) користи се за преносни пут између два уређаја уколико се сигнал преноси директно од предајника ка пријемнику, без икаквих уређаја између њих осим појачавача и уређаја који обнављају сигнал<sup>5</sup>. На слици 4.2 приказана је директна

<sup>1</sup> Дигитализовани говор

<sup>2</sup> Банкарске трансакције

<sup>3</sup> *Hardwire*

<sup>4</sup> *Softwire*

<sup>5</sup> Користе се термини рипитер (енг. *repeat*) и регенератор.



Слика 4.2 Конфигурације а) тачка-тачка, б) више тачака

веза. Уочимо да се овај термин може искористити и за жичне и за бежичне медијуме.

Постоје два типа веза: тачка-тачка<sup>1</sup> и више тачака<sup>2</sup>. Када постоји директна веза између два уређаја (станице) и само они деле медијум, веза се назива тачка-тачка (слика 4.2а). У конфигурацији са више тачака више од два уређаја деле медијум (4.2б). У оба случаја канал или веза могу да буду симплекс, полу дуплекс, или потпуни дуплекс. У симплекс преносу сигнал се преноси само у једном правцу; једна станица је предајник а друга пријемник. У полудуплекс операцији обе станице могу да преносе сигнал, али само једна по једна. У потпуном дуплексу обе станице могу да шаљу сигнале истовремено.

#### Фреквенција, спектар и пропусни опсег

У анализама које следе бавићемо се електромагнетним сигнаlima као средством за пренос порука. На слици 4.3 сигнал који генерише предајник шаље се преко преносног медијума<sup>3</sup>. Сигнал је функција времена, али се такође може описати и као функција учестаности. Значи, сигнал се може представити сумом простопериодичних компоненти различите учестаности. Посматрање слике сигнала у фреквенцијском домену много је важније за разумевање преноса података од посматрања сигнала у временском домену.

#### Концепт временског домена

Посматрано у функцији времена, електромагнетски сигнал може бити аналогни<sup>4</sup> или дигитални<sup>5</sup>. Аналогни сигнал је онај чији се интензитет мења континуално у времену.

Математичка дефиниција је: сигнал  $s(t)$  је континуалан уколико је за свако  $a$ :

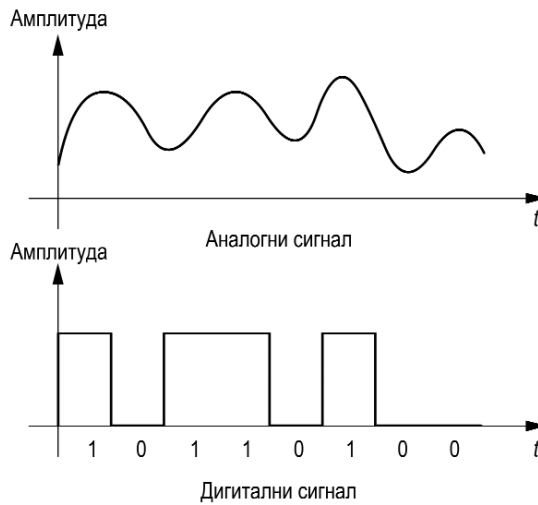
<sup>1</sup> Point to point

<sup>2</sup> Multipoint

<sup>3</sup> Користе се термини: средина за пренос, преносни медијум и трансмисиони медијум.

<sup>4</sup> Математички континуалан.

<sup>5</sup> Математички дискретан



Слика 4.3 Аналогни и дигитални сигнали

$$\lim_{t \rightarrow a} s(t) = s(a) \tag{4.1}$$

Другим речима, не постоје прекидне тачке или дисконтинуитети. Сигнал је дигиталан уколико је његов интензитет константног нивоа у одређеном периоду времена а затим се промени на други константан ниво<sup>1</sup>. Слика 4.3 показује пример обе врсте сигнала. Континуалан сигнал може да представља говор, а дигиталан сигнал може да презентује бинарно 1 или 0.

Најједноставнија врста сигнала је периодичан сигнал у коме се после одређеног временског интервала  $T$  понавља исти облик сигнала. Слика 4.4 показује пример периодичног континуалног сигнала (синусни сигнал) и периодичног дискретног сигнала (правоугаони сигнал). Математички сигнал  $s(t)$  је периодичан ако и само ако је:

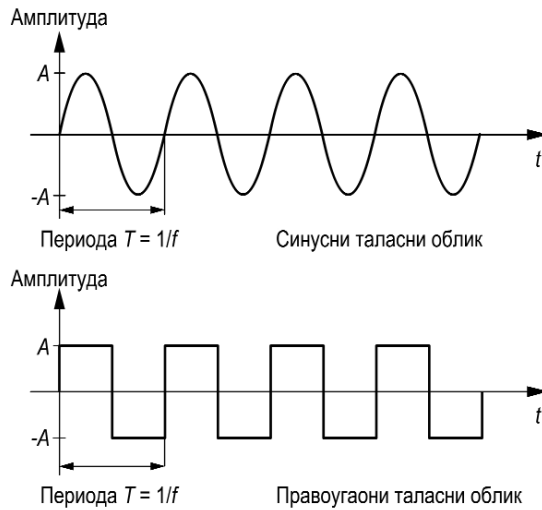
$$s(t + kT) = s(t) \quad -\infty < t < +\infty, \quad k = 1, 2, \dots \tag{4.2}$$

Најједноставнији периодични сигнал је простопериодични сигнал. Три важне карактеристике простопериодичног сигнала су амплитуда ( $A$ ), фреквенција ( $f_0$ ) и фаза ( $\theta$ ). Амплитуда је максимална вредност сигнала и мери се у волтима ( $V$ ). Фреквенција је инверзна периоди ( $1/T_0$ ) и једнака је броју понављања периоде у секунди; изражава се у циклусима у секунди<sup>2</sup>, или херцима ( $Hz$ ). Фаза је мера релативне позиције у времену у оквиру једног периода сигнала. Као пример слика 4.5 показује два простопериодична сигнала која су фазно померена за  $\pi/2$  радијана ( $2\pi$  радијана  $360^\circ = 1$  периода). Тако можемо да представимо синусоиду као:

$$s(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \theta) \tag{4.3}$$

<sup>1</sup> Ово је дефиниција идеалног случаја. У стварности, прелазак (транзиција) са једног напонског нивоа на други није тренутна, већ постоји одређени прелазни период.

<sup>2</sup> cps



Слика 4.4 Пример периодичног сигнала: синусни и правоугаони таласни облик

где је  $A$  амплитуда,  $f_0$  је учестаност, а  $\theta$  је фаза. Уочимо да се синусни сигнал на слици 4.5 може представити као један од сигнала:

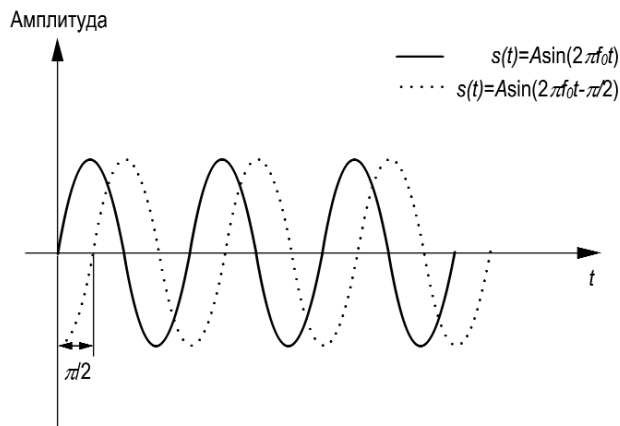
$$s(t) = A \sin(2\pi f_0 t) \quad (4.4)$$

$$s(t) = A \cos(2\pi f_0 t - \frac{\pi}{2}) \quad (4.5)$$

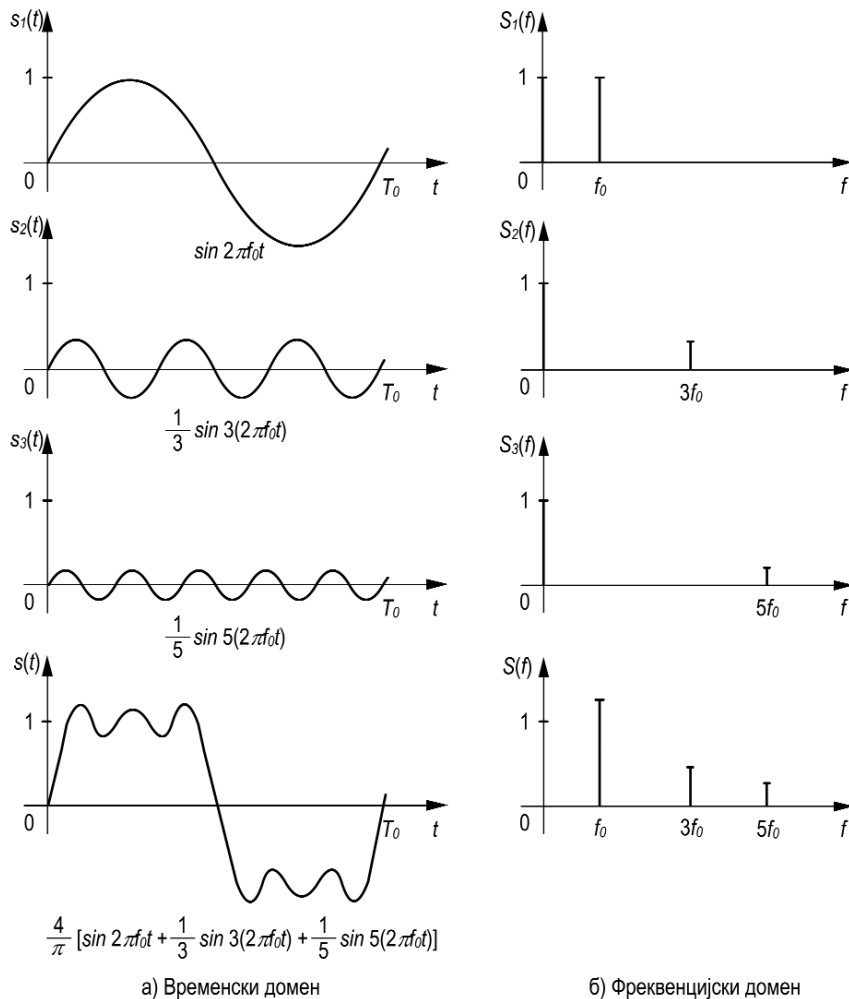
### Концепт фреквенцијског домена

До сада смо сигнал посматрали као функцију времена. Сигнал се може посматрати и у функцији фреквенције (слика 4.6) тако што ће се представити сумом простопериодичних сигнала.

$$s(t) = \frac{4}{\pi} \left[ \sin 2\pi f_0 t + \frac{1}{3} \sin 3(2\pi f_0) t + \frac{1}{5} \sin 5(2\pi f_0) t \right] \quad (4.6)$$



Слика 4.5 Пример разлике у фази синусног сигнала



Слика 4.6 Сигнал са три фреквенцијске компоненте у временском и фреквенцијском домену

Посматрајући слику 4.6 можемо да уочимо следеће:

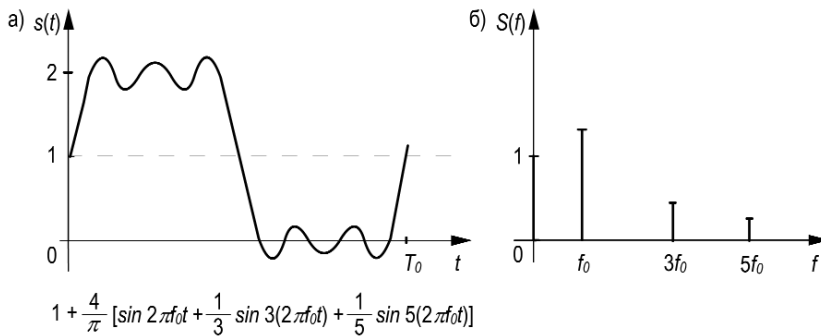
- компоненте овог сигнала су синусни таласи фреквенције  $f_0$ ,  $3f_0$  и  $5f_0$ ,
- када су све фреквенцијске компоненте сигнала целобројни умножци једне одређене учестаности онда се она назива основна учестаност,
- период резултујућег сигнала  $s(t)$  једнак је периоди сигнала основне учестаности.

Периода компоненте  $\sin 2\pi f_0 t$  је  $T_0 = 1/f_0$ , а периода сигнала  $s(t)$  је такође  $T_0$ .

Можемо показати, користећи дисциплину која се назива Фуријеова<sup>1</sup> анализа, да се било који електромагнетни сигнал може представити као скуп простопериодичних аналогних сигнала (синусоида) различите амплитуде, учестаности и фазе.

Можемо рећи да за сваки сигнал постоји функција у временском домену,  $s(t)$ , којом је одређена вредност сигнала у сваком тренутку времена. Слично, постоји функци-

<sup>1</sup> Француски математичар *Jean-Baptiste Fourier*



Слика 4.7 Сигнал са једносмерном компонентом: а) у временском б) у фреквенцијском домену

ја у фреквенцијском домену,  $S(f)$ , која специфицира амплитуду (максималну вредност) компоненти од којих се тај сигнал састоји. Та функција назива се амплитудски спектар. Слика 4.6б показује амплитудски спектар у фреквенцијском домену за сигнале на слици 4.6а. Уочимо да је у овом случају  $S(f)$  дискретна функција. Спектар сигнала заузима одређени опсег учестаности. За сигнал са слике 4.6а спектар се простира од  $f_0$  до  $5f_0$ . У претходном случају ширина опсега спектра сигнала<sup>1</sup> је  $4f_0$ . Многи сигнали имају неограничен спектар. Међутим, највећи део снаге сигнала који представљају реалне поруке садржан је у релативно уском опсегу учестаности. Овај опсег учестаности назива се ефективни опсег спектра или само опсег спектра сигнала.

Термин који је потребно дефинисати је једносмерна<sup>2</sup> компонента. Уколико сигнал садржи и компоненту нулте учестаности та компонента је једносмерна или константна компонента. Без једносмерне компоненте сигнал има средњу вредност једнаку нули. Са једносмерном компонентом он има фреквенцијску компоненту на  $f=0$ , и средњу вредност различиту од 0. На пример на слици 4.7 приказано је додавање једносмерне компоненте сигналу са слике 4.6а па једначина (4.6) сада гласи:

$$s(t) = 1 + \frac{4}{\pi} \left[ \sin 2\pi f_0 t + \frac{1}{3} \sin 3(2\pi f_0) t + \frac{1}{5} \sin 5(2\pi f_0) t \right] \quad (4.7)$$

На слици 4.8 представљен је импулс у времену који има вредност 1 између  $-T/2$  и  $+T/2$  и 0 за остале тренутке времена. Његова слика у фреквенцијском домену  $S(f)$  приказана је на слици 4.8б. Спектар овог сигнала  $S(f)$  је неограничена функција учестаност и<sup>3</sup>.

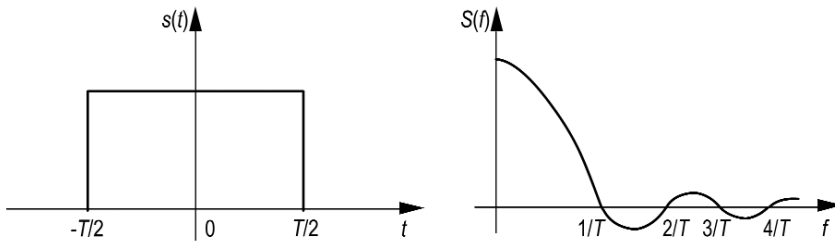
## 4.2 Веза између брзине података и опсега

Дефинисали смо да је ефективни опсег спектра сигнала онај опсег спектра у коме је сконцентрисан највећи део енергије сигнала. Термин „највећи” употребљен је прилично произвољно. Важно је уочити да иако задати таласни облик може да садржи учестаности из веома широког опсега, било који преносни систем (предајник, трансми-

<sup>1</sup> У литератури се среће и други начин дефинисања опсега: од 0 до  $5f_0$

<sup>2</sup> Direct current

<sup>3</sup> У ствари, функција  $S(f)$  у овом случају је симетрична у односу на  $f = 0$ , тако да садржи и вредности за негативне учестаности. Присуство негативне учестаности је математички део и објашњење је ван домена овог уџбеника.



Слика 4.8 Правоугаони импулс вредности 1, трајања од  $+T/2$  до  $-T/2$  у временском и фреквенцијском домену

сиони медијум и пријемник) може да прихвати само ограничени опсег учестаности. Ово као последицу даје ограничење у брзини података који могу да се пренесу тим трансмисионим системом.

У једноставном примеру, погледајмо правоугаони таласни облик на слици 4.9а. Претпоставимо да позитиван импулс представља бинарно 1 а негативни импулс бинарно 0. Сигнал тада представља бинарни низ 1010...па је периода овог сигнала  $T_0$  једнака двоструком трајање импулса<sup>1</sup>  $T_b$  ( $T_0 = 2T_b$ ). Ако је брзина података бинарне поворке импулса  $R$  (b/s), онда је трајање једног импулса  $T_b = 1/R$ , периода бинарног низа је  $T_0 = 2/R$  а учестаност  $f_0 = R/2$ . Које су простопериодичне компоненте овог сигнала? Да бисмо одговорили на ово питање посматрајмо слику 4.6. Сабирањем синусних компонената учестаности  $f_0$  и  $3f_0$ , па затим додавањем  $5f_0$  видели смо да је добијени таласни облик све сличнији правоугаоном таласном облику периоде  $f_0$ . Показаћемо да се правоугаони таласни облик са слике 4.9 може аналитички представити као:

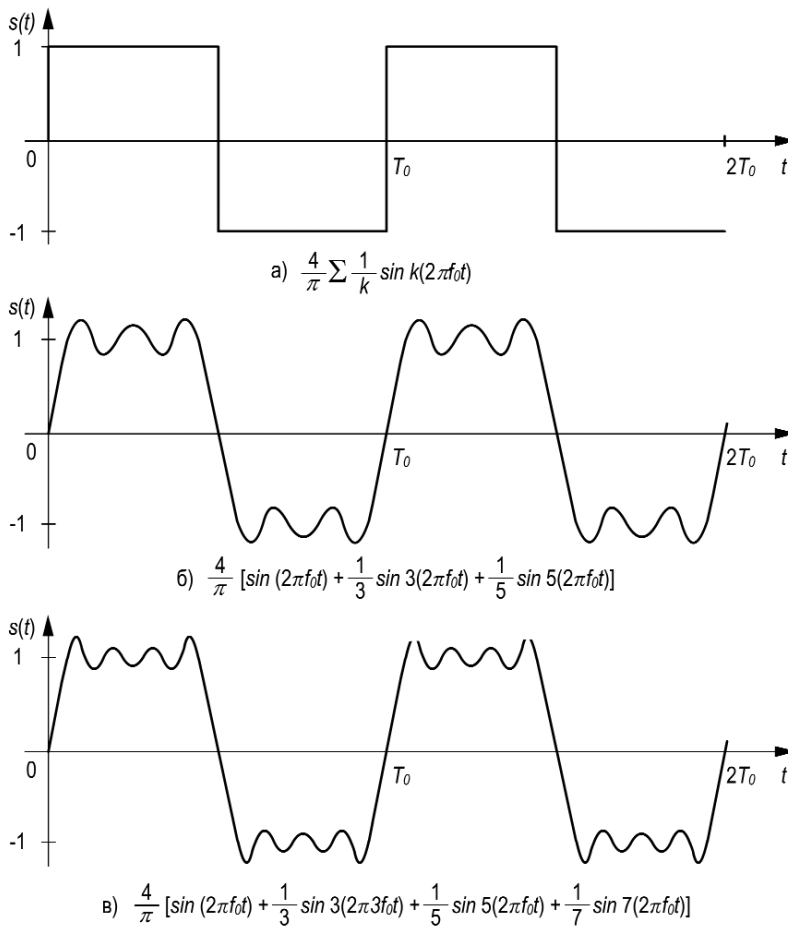
$$s(t) = \frac{4A}{\pi} \sum_k \frac{1}{k} \sin k(2\pi f_0 t) \quad \text{где је } k \text{ непаран број } \{1, \infty\} \quad (4.8)$$

Види се да максимална амплитуда синусних компонената опада, тако да је максимална амплитуда  $k$ -те фреквенцијске компоненте (учестаности  $kf_0$ ) једнака  $1/k$  од максималне амплитуде првог хармоника (учестаности  $f_0$ ). Снага простопериодичног сигнала пропорционална је квадрату амплитуде тог простопериодичног сигнала. То значи да је снага сигнала сконцентрисана у првих неколико фреквенцијских компонената. Шта ће се десити уколико ограничимо опсег спектра сигнала на само прве три фреквенцијске компоненте? Такав сигнал приказан је на слици 4.9б, а упоређивањем видимо да је он веома сличан оригиналном правоугаоном сигналу (слика 4.9а). Додавањем синусне компоненте учестаности  $7f_0$  таласни облик се значајно не мења (слика 4.9в).

Ову слику можемо употребити да бисмо илустровали везу између брзине података и опсега. Претпоставимо да користимо дигитални преносни систем који може да преноси сигнале чији спектар је опсега 4MHz. Послаћемо секвенцу бита која се састоји од наизменичних „1” и „0” (као што је правоугаони сигнал на сл. 4.9а).

Апроксимирајмо ову секвенцу бита сигналом на слици 4.9б. Иако је овај сигнал

<sup>1</sup> У овом примеру поворка 1010... је периодичан сигнал и његова периода једнака је двоструком трајању битског интервала. Ако бисмо посматрали неку другу периодичну поворку на пример 100100...њена периода била би једнака троструком трајању битског интервала итд.



Слика 4.9 Компоненте правоугаоног таласног облика

„изобличени” правоугаони сигнал, он је довољно сличан правоугаоном тако да ће пријемник моћи да направи разлику између бинарног „1” и бинарног „0”. Уколико претпоставимо да је  $f_0=1\text{MHz}$ , онда је опсег спектра сигнала (слика 4.6б):

$$B = f_0^1 - 5f_0 = 1\text{MHz} - 5\text{MHz} = 4\text{MHz} \quad (4.9)$$

Уочимо да за  $f_0=1\text{MHz}$ , периода  $T_0=1/10^6=10^{-6}=1\mu\text{s}$ . Пошто смо претпоставили да се сигнал састоји од наизменичних „1” и „0”, једна периода се састоји од једне „1” и једне „0”. Трајање сваког бита је  $0,5\mu\text{s}$ , а брзина (број бита у једној секунди) је  $1/(0,5 \cdot 10^{-6}) = 2 \cdot 10^6 = 2\text{Mb/s}$ . То значи да је за брзину од  $2\text{Mb/s}$  довољно пренети опсег спектра сигнала од  $4\text{MHz}$ , односно обезбедити ширину канала од  $4\text{MHz}$ .

На основу претходне анализе можемо да закључимо следеће: дигитални сигнал генерално има спектар неограничене ширине (једначина 4.8). Уколико покушавамо да пошаљемо сигнал преко било каквог трансмисионог медијума преносни систем ће

<sup>1</sup> Разлика између највише и најниже компоненте у спектру.

ограничити опсег спектра сигнала који желимо да пошаљемо. С друге стране што је шири пропусни опсег трансмисионог медијума то је његова цена већа. Због тога економски и практични разлози налажу да се дигиталне информације шаљу сигналама ограниченог опсега спектра. Ограничење опсега спектра сигнала генерише изобличења која отежавају интерпретацију примљеног сигнала. Што се опсег спектра сигнала више ограничава то се повећава изобличење сигнала и повећава се могућност грешке на пријему.

На слици 4.10 графички је приказана претходно спроведена анализа за брзину података од 2000b/s. Посматрамо дигитални сигнал који пропуштамо кроз преносни систем различитог пропусног опсега: од 500Hz до 4000Hz. Са пропусним опсегом од 2500Hz или чак 1700Hz излазни сигнал довољно добро представља оригинални дигитални сигнал. Можемо да генерализујемо овај резултат: уколико је дигитални сигнал брзине  $R$  (b/s) онда се веома добро представљање сигнала може постићи опсегом спектра сигнала од  $2 \cdot R$  (Hz). Уколико шум није велики оригинални сигнал може се реконструисати мада је примљени (пренесени) сигнал мањег опсега спектра. Постоји директна веза између брзине сигнала и опсега спектра сигнала. Што је већа брзина сигнала већи је ефективни опсег спектра тог сигнала. Посматрано на други начин: што је већи пропусни опсег преносног система то је већа брзина података која се њиме може пренети.

### 4.3 Снага сигнала

Важан параметар у било ком систему преноса је снага сигнала који се преноси. Сигнал се преноси трансмисионим медијумом и долази до губитка или слабљење снаге сигнала. Да би се надокнадио губитак и повећала снага сигнала могу се у одређеним тачкама везе поставити појачавачи. Уобичајено је појачање<sup>1</sup> ( $G$ ), слабљење<sup>2</sup> ( $L$ ) и релативне нивое посматрати у децибелима пошто:

- снага сигнала обично опада експоненцијално са растојањем, тако да се губитак једноставно описује преко децибела који су логаритамска јединица,
- добитак и губитак у каскадном преносном путу могу се израчунати једноставним операцијама сабирања или одузимања.

Децибели су мера за разлику између нивоа два сигнала:

$$N_{dB} = 10 \log \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (4.10)$$

где је:

$N_{dB}$  - разлика у децибелима,

$P_1$  - снага сигнала на улазу система,

$P_2$  - снага сигнала на излазу система,

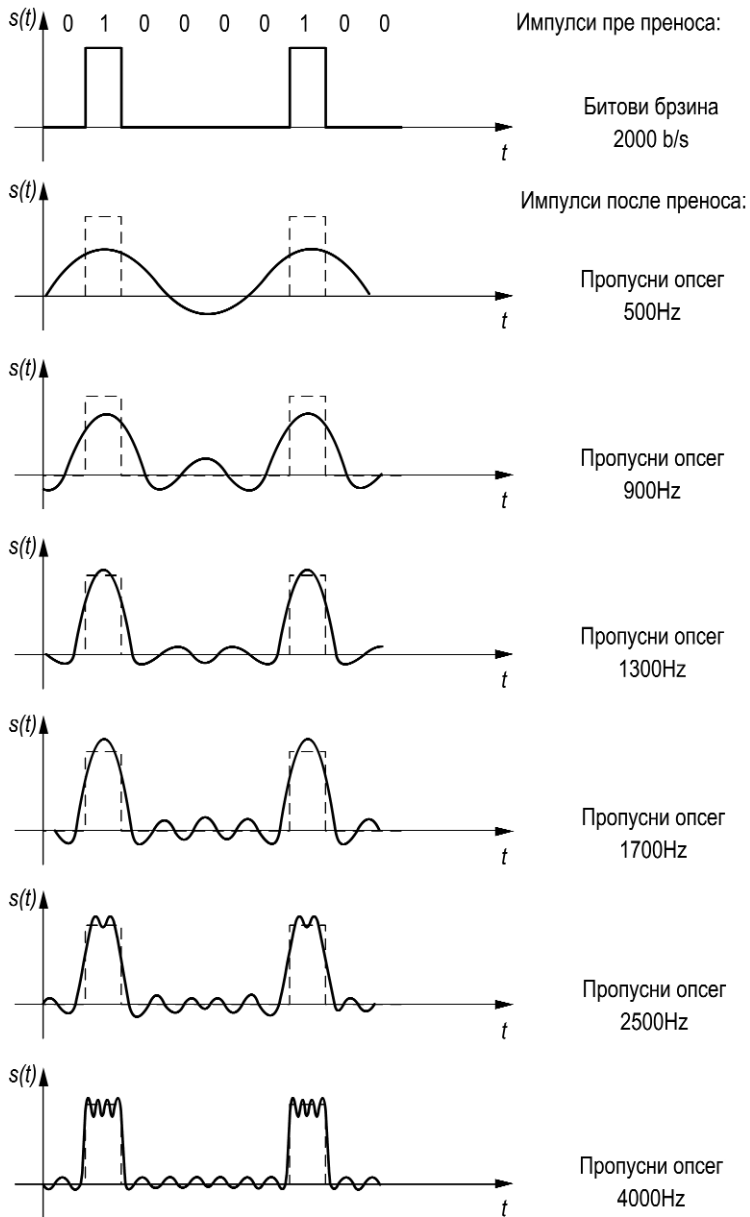
$\log$  - логаритам за основу 10 ( $\log_{10}$ ).

Када је однос снага дефинисан као у једначини 4.10 онда појачање ( $G$ ) има позитивну вредност а слабљење ( $L$ ) негативну вредност. Слабљење се може дефи-

<sup>1</sup> Gain

<sup>2</sup> Loss

#### 4. Комуникациони модел



Слика 4.10 Утицај пропусног опсега канала

нисати као однос снаге сигнала на улазу и излазу система и тада је његова вредност позитивна.

На пример, уколико треба пренети сигнал снаге 10mW и ако је после одређеног растојања снага тог сигнала 5mW његово слабљење може се изразити на следећи начин:

$$L = 10 \log \left( \frac{5}{10} \right) = 10 * (-0.3) = -3 \text{dB}$$

Уочимо да је децибел мера релативне (а не апсолутне) разлике. Смањење снаге са 1000W на 500W такође је губитак -3dB. Децибел се исто тако користи за мерење разлике у напону. Узимајући да је снага пропорционална квадрату напона:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (4.11)$$

где је:

$P$  - снага која се дисипира преко отпорника  $R$ ,

$U$  - напон на отпорнику  $R$

па је:

$$N_{dB} = 10 \log \left( \frac{P_2}{P_1} \right) = 10 \log \frac{U_2^2 / R}{U_1^2 / R} = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \quad (4.12)$$

Децибел је погодан за одређивање свеукупне разлике снаге у преносном систему, који се састоји од преносних линија на којима долази до опадања снаге сигнала (слабљења) и појачавача који се постављају да би тај губитак надокнадили (појачања). Вредност у децибелима односи се на релативну величину или промене у величини, не на апсолутни ниво. Некада је потребно ослонити се на апсолутни ниво снаге или напона у децибелима. У употреби је неколико изведених јединица.

У микроталасним апликацијама користи се јединица dBW (децибел ват). Вредност од 1W изабрана је као референтна и означава 0 dBW. Апсолутни ниво снаге у децибелима дефинише се као:

$$P_{dBW} = 10 \log \left( \frac{P_W}{1W} \right) \quad (4.13)$$

На пример снага од 1000W може се представити као 30dBW, а снага од 1mW као -30dBW. У видео апликацијама користи се јединица dBmV (децибел милivolт). Вредност од 1mV изабрана је као референтна и означава 0 dBmV. Апсолутна вредност напона у децибелима дефинисана је као:

$$U_{dBmV} = 20 \log \frac{U_v}{1mV} \quad (4.14)$$

На пример, посматрајмо тачка-тачка везу две станице са слике 4.2a. Претпоставићемо да је слабљење на преносном путу од једне станице до појачавача 13dB, појачање појачавача 30dB, а слабљење на преносном путу од појачавача до друге станице 40dB. Свеукупна разлика је  $-13 + 30 - 40 = -23 \text{dB}$ . Уколико је снага сигнала на улазу првог дела преносног пута -30dBW онда је снага излазног сигнала, тј. снага примљеног сигнала на месту друге станице -53dBW.