

Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

redakce nakladatelství BEN – technická literatura
redakce@ben.cz



5.1 ÚVODNÍ POZNÁMKA



Než se zamyslíme nad prvními vývojovými kroky projektu, rád bych shrnul základní výchozí body celého návrhu analogového přijímače:

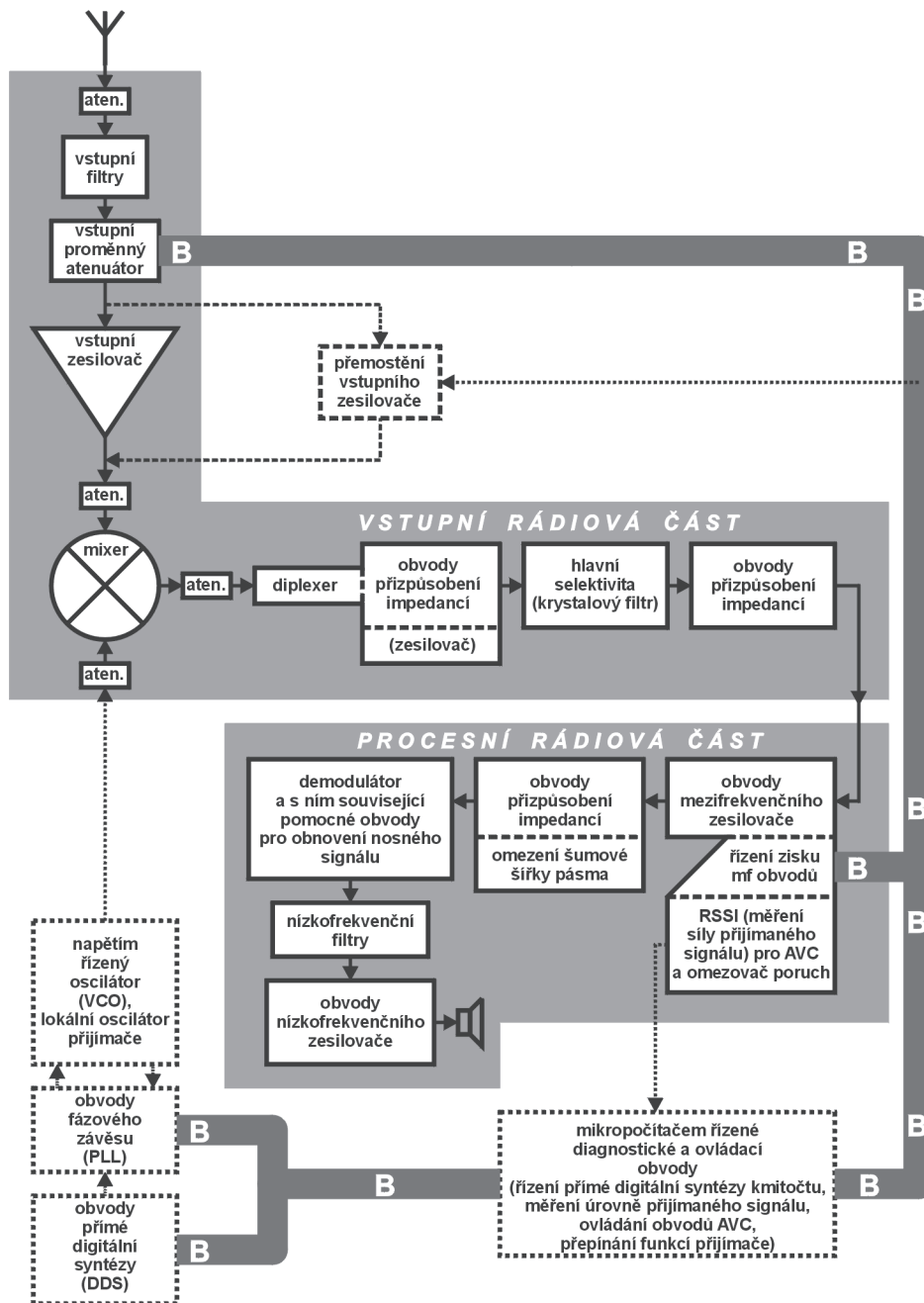
- *navrhovaný přijímač bude používat princip superhetu s jedním směšováním, typu „down convertor“. Meziřekvenční signál má aspoň v části pracovního rozsahu přijímače nižší kmitočet než přijímaný signál. Postup při návrhu přijímače typu „up convertor“, kde má meziřekvenční signál vyšší kmitočet než přijímaný signál, je ve svém principu i v praktických krocích stejný,*
- *v konkrétní části se návrh bude týkat moderního přijímače s pracovním rozsahem v krátkovlnné oblasti, i když všechny poznatky v obecné rovině platí pro konstrukci přijímače s libovolným pracovním kmitočtovým rozsahem, byť s jistými specifiky,*
- *důraz bude kladen na vstupní rádiovou část, ovlivňující v současné komunikační aréně nejpodstatnější rádiové parametry.*

Přestože je blokové schéma superhetu na *obr. 5.1* dobře známé zapojení, pokusím se o poněkud jiný a celistvější pohled na jeho strukturu a funkční souvislosti. Cílem je totiž kompaktní návrh, jehož postup bude použitelný i pro vstupní část softwarově definovaného digitálního přijímače (SDDR), o němž pojednává kapitola další. Proto jsou ve schématu vyznačeny v blocích dvě části.

První část lze nazvat vstupní rádiovou částí a někteří specialisté, pojednávající o softwarově definovaném digitálním rádiu, ji nazývají s humorem technikům vlastním „air interface“. Zahrneme-li do našich úvah i anténu, je to velice výstižné. Tento blok má vliv na klíčové parametry přijímače, kam zařadíme v prvním přiblížení jeho dynamický rozsah a charakteristiky selektivity.

Druhou část lze potom nazvat procesní rádiovou částí. Jejím cílem je především co nejučinněji obnovit původní signál, který je rádiovou cestou přenášen. Kromě demodulačních, dekódovacích a s těmito funkcemi souvisejících obvodů sem patří i obvody automatického vyrovnávání citlivosti, filtry, různé omezovače poruch, kanálové ekvalizéry apod. Dynamický rozsah přijímače vně pracovního kanálu tento blok již ovlivňovat nemá, nepočítáme-li v to funkci obvodů AVC. Ovšem v rámci pracovního kanálu, tedy v propustném pásmu filtru hlavní kanálové selektivity, je dynamický rozsah přijímače významným způsobem ovlivňován i touto částí – na což se často zapomíná!

Po krátkém úvodu a na tomto místě není nutné pouštět se do podrobnějšího rozboru jednotlivých částí a lze tedy přistoupit k hlavnímu bodu programu – k zahájení návrhu rádiového přijímače.



Obr. 5.1
Schéma superhetu s jedním směřováním.

5.2 ZÁSADNÍ HLEDISKO NÁVRHU – PARAMETRY DYNAMICKÉHO ROZSAHU



Pokud usilujeme o vývoj přijímače, jenž má splňovat moderní nároky na elektromagnetickou slučitelnost, dané v současné době již značně vytíženým rádiovým spektrem, výchozí úvahy návrhu se v naprosté většině případů odvíjejí od jediného společného jmenovatele – chceme rádio s co největším dynamickým rozsahem.

Teprve nad tímto základním požadavkem stojí další požadované parametry, týkající se charakteristik selektivity apod. Dynamický rozsah lze definovat různě a jedna z možných definic je uvedena v předchozí kapitole 4.1.4.



Ještě než se pustíme do jednotlivých kroků, ve kterých se budeme výhradně držet vyjadřování v decibelech, uveďme odvození šumové bilance přijímače – nutné pro kalkulace s dynamickým rozsahem – v oblasti lineárního vyjádření:

V kapitole 3.8.1 bylo uvedeno, že dosažitelný šumový výkon na reálném odporu – v tomto případě na vstupu přijímače – je:

$$P_{\text{noise}} = k \cdot T \cdot B.$$

Tento šum, přicházející do přijímače, je zesilován $G \times$ (úměrně výkonovému zisku přijímače) a zvětšován $F \times$ (úměrně šumovému faktoru⁸⁴ přijímače). Na výstupu z přijímače potom bude šumový výkon:

$$P_{\text{noise_out}} = F \cdot k \cdot T \cdot B \cdot G.$$

Upravíme-li tuto rovnici pomocí jednoduchého matematického triku, dostaneme:

$$P_{\text{noise_out}} = k \cdot T \cdot B \cdot G + (F - 1) \cdot k \cdot T \cdot B \cdot G,$$

což ilustruje šumovou bilanci na výstupu přijímače: k výstupnímu šumovému výkonu ideálního „bezšumového“ přijímače s výkonovým zesílením G (první součinn na pravé straně rovnice) se přičítá výkon šumu, vznikajícího až v přijímači.

⁸⁴ Připomeňme, že šumové číslo je desetinásobkem desítkového logaritmu šumového faktoru, proto nikdy nezaměňujeme šumový faktor s šumovým číslem!

Ale vraťme s k logaritmickeému vyjadřování těchto skutečností v decibelech, neboť počítání je potom daleko snazší a v radioelektronické praxi používanější a přirozenější.

Úvahy o novém rádiovém přijímači zahájíme úvahami o jeho nárokováném dynamickém rozsahu a o jeho limitaci zdola od šumového prahu. Dostaneme jeden ze základních výchozích bodů (druhým je požadovaná odolnost), od kterého již můžeme podnikat první konkrétní návrhové kroky. Pokud se zamýšlíme nad analýzou citlivosti přijímače, první krok, kterým zahájíme úvahy, je určení úrovně tepelného šumu v rámci šířky pásma zpracovávaného signálu.

Šumový práh a šumové číslo přijímače spolu úzce souvisí, to je na první pohled zřejmé. Než začneme dále s těmito parametry pracovat, zopakujme si jedno z velmi důležitých čísel, používaných při návrhu mnoha komunikačních systémů. Zopakujme, že tímto číslem je výkon šumu na reálném odporu vztažený na 1 Hz při teplotě $T = 290$ K, viz kapitola 3.8.1:

$$10 \cdot \log(k \cdot T) = -174 \text{ dBm}, \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K.}$$

Proč je toto číslo tak důležité? Zjednodušeně řečeno, kromě speciálních případů (kdy bychom například chladili vstupní obvody přijímače) můžeme s použitím této konstanty jednoduše spočítat minimální principiálně danou injekci šumu do vstupu přijímače, která pak omezuje dosažitelnou citlivost přijímače. **Rádiový přijímač s šumovým číslem 0 dB a s šířkou pracovního kanálu 1 Hz by tedy mohl zpracovat minimální detekovatelný signál o úrovni -174 dBm – a to s odstupem tohoto signálu od šumu 0 dB – protože kvůli termodynamickým jevům je zároveň s ním injektován do vstupu přijímače i šumový výkon -174 dBm v 1 Hz šířky pásma** (pokud se náš test odehrává při oněch 17 °C).

Dále platí, že tento šum můžeme považovat za náhodný a že má jednu nepříjemnou vlastnost: kanál rádiového přijímače v jeho případě působí jako integrátor a výkon šumu lineárně narůstá s šířkou zpracovávaného pásma.

V ideálním případě se tak užitečný rádiový signál vstupující anténním konektorem do přijímače bude zpracovávat zároveň se šumem, jehož výkon bude dán šumovou šířkou pásma hlavního filtru soustředěné selektivity – pro filtry se strmou amplitudovou charakteristikou prakticky shodnou s šířkou jejich pásma měřenou až do útlumu 6 dB. Soustředíme-li se na návrh speciálního krátkovlnného přijímače pro radioamatérský provoz technikou SSB, bude tedy zpracovávaný signál procházet v přijímači filtrem s šířkou pásma přibližně 3 kHz⁸⁵ a zároveň s ním se v pracovním kanálu přijímače objeví šum s výkonem:

$$P_{\text{noise_IN}}[\text{dBm}] = -174[\text{dBm/Hz}] + 10 \cdot \log(B_{\text{main_sel_flt}})[\text{dBHz}] = -139 \text{ dBm.}$$

⁸⁵ Dosadíme-li šumovou šířku pásma s „malou“ rezervou větší, získáme tak jistou rezervu i ve výsledku výpočtu. S podobnými postupy je nutné nakládat uvážlivě – musíme vždy dopředu vědět, co tím sledujeme.

Zde vidíme efekt lineárního nárůstu výkonu šumu v rámci šířky pásma pracovního kanálu: z výchozího výkonu -174 dBm v 1 Hz šířky pásma nám výsledná hodnota šumového výkonu v kanálu širokém 3 kHz naroste na -139 dBm, tedy o 35 dB ($10\log 3000$)! Pro dané úvahy o šumovém prahu přijímače můžeme tedy předpokládat, že signál s výkonovou úrovní -139 dBm bude mít při zpracování tak širokým filtrem odstup od výkonu šumu právě pouze 0 dB, a to i v tomto případě, kdy prozatím uvažujeme „bezšumový“ přijímač se šumovým číslem 0 dB! Kdybychom ovšem použili velice „úzký“ filtr pro telegrafní provoz s šířkou pásma 600 Hz, tedy 5× menší (-7 dB), mohli bychom tento signál přijímat teoreticky se 7 dB odstupem od šumu – a to se již jedná o čitelný telegrafní signál. Mimochodem, s trochou počítání snadno zjistíme, že se v tomto případě jedná o signál s mimořádně malým výkonem $1,3 \cdot 10^{-17}$ W, od kteréhožto čísla naši představitost nelineární logaritmické jednotky spolehlivě izolují⁸⁶.

Metody, jak snižovat šum obvodů, majoritně určujících šumové číslo přijímače, existují. Pohledem na vzorec se přímo nabízí snižování teploty vstupních obvodů, ale v praxi toho na krátkovlnných pásmech v žádném případě není třeba. **Limitním faktorem minimální síly signálů, které na těchto pásmech chceme přijímat, je totiž šum různého původu, přicházející z antény zároveň s užitečným signálem.** Bez hlubšího rozboru a na základě zkušeností je možné uvést, že přijímač se šumovým číslem 10 dB na krátkých vlnách umožňuje dosažení maximální použitelné užitečné citlivosti. V dalších krocích uvidíme, že není dobré zbytečně minimalizovat šumové číslo přijímače; tento postup je totiž vykoupen zhoršováním vlastností přijímače při zpracovávání signálů s velkou výkonovou úrovní.

Protože šumové číslo udává zhoršení výstupního poměru signálu k šumu daného bloku vzhledem k jeho příslušným vstupním hodnotám, minimální detekovatelný signál se dále musí zvětšit právě o šumové číslo přijímače, neboť zpracováváný šum dále naroste adekvátně šumovému číslu (budeme předpokládat navrhovanou hodnotu šumového čísla 10 dB):

$$P_{\text{noise_IN}}[\text{dBm}] = -174 [\text{dBm/Hz}] + 10 \cdot \log_{10}(B_{\text{main_sel_flt}}) [\text{dB(Hz)}] + NF [\text{dB}] = -129 \text{ dBm}.$$

Rázem se tak dostáváme k hodnotám výkonu zpracovávaného šumu, které už prakticky určují dosažitelnou citlivost přijímače. Ta koresponduje s hodnotami citlivosti, kterou udávají renomovaní výrobci u svých zařízení a která je pro krátkovlnná pásma dostatečná. Zde musím poznamenat, že dosažení tohoto parametru je velice snadnou a zároveň ekonomicky levnou záležitostí; vlastní práce nastane až při navrhování vstupního rádiového bloku se současným zřetelem na požadovanou vysokou odolnost vůči silným signálům. V praxi je hodnota šumového čísla a citlivosti versus odolnost dána vždy rozumným kompromisem, protože současné splnění obou uvedených maximalizovaných kritérií by bylo ekonomicky velmi náročným řešením.

⁸⁶ Na krátkovlnných pásmech je tak slabý signál většinou maskován šumem nejrůznějšího původu.

Celou záležitost zjednodušuje právě onen fakt, že u krátkovlnného rádiového přijímače se jeví dostatečným šumové číslo 10 dB, zatímco na druhé straně, na mikrovlnných pásmech, kde je nutné šumové číslo minimalizovat, zase není nutné disponovat tak odolnými vstupními obvody.



Šumové číslo 10 dB se často uvádí jako standardní hodnota užitečného, resp. využitelného šumového čísla krátkovlnného přijímače, neboť rušivé signály různého původu, injikované v rámci krátkovlnného rozsahu do vstupu rádiového přijímače zároveň s užitečným signálem, neumožňují využití menších hodnot šumového čísla – přijímaný signál je totiž těmito rušivými signály maskován. Pouze v případech, kdy je na vstup přijímače připojena anténa s nízkou účinností – v případě krátkovlnného přijímače se jedná např. o krátkou prutovou anténu – není zbytečné navrhnout přijímač s nižším šumovým číslem, typicky kolem 7 dB.

(Přijímače pro pásma velmi krátkých vln a vyšší obecně vyžadují šumové číslo kolem 1 dB a menší!)

Do oblasti limitace⁸⁷ dynamického rozsahu přijímače patří bezesporu i problematika fázového šumu hlavního lokálního oscilátoru přijímače, který se dostává do pracovního kanálu přijímače reciprokým směřováním, viz kapitola 4.1.5. Jeho vliv bude rozváděn ještě v dalších kapitolách; zde je uveden praktický důsledek reciprokého směřování hlavně z toho důvodu, že omezuje schopnost přijímače přijímat slabý užitečný signál stejným způsobem, jako šum tepelný.

Získali jsme jeden ze základních požadavků: budeme se snažit navrhnout co nejodolnější rádiový přijímač s šumovým číslem 10 dB. Pro určení dynamického rozsahu a jeho limitace shora a předtím, než zahájíme konkrétní návrh rádia, zbývá rozbor jeho potřebné odolnosti.

Při všech úvahách o odolnosti se budeme držet intermodulačních mechanismů, konkrétně pak degradacemi příjmu intermodulačními produkty třetího řádu. Existují sice jednodušší metody, jako například měření bodu jednodéciblové komprese nebo blokování jedním silným rušícím signálem, ale dvousignálové měření intermodulační odolnosti charakterizuje linearitu měřeného obvodu robustním způsobem a je širou používané.

Nyní se tedy nabízí otázka: jak odolný musí krátkovlnný přijímač být? Jakou výkonovou úroveň by měl mít bod zahrazení, intercepční bod (průsečík), intermodulačního produktu třetího řádu se základním produktem, tedy stručně řečeno IP3?

⁸⁷ Fázový šum ale omezuje reciprokým směřováním horní hranici dynamického rozsahu; nikoliv spodní, jako je tomu u šumového čísla přijímače.