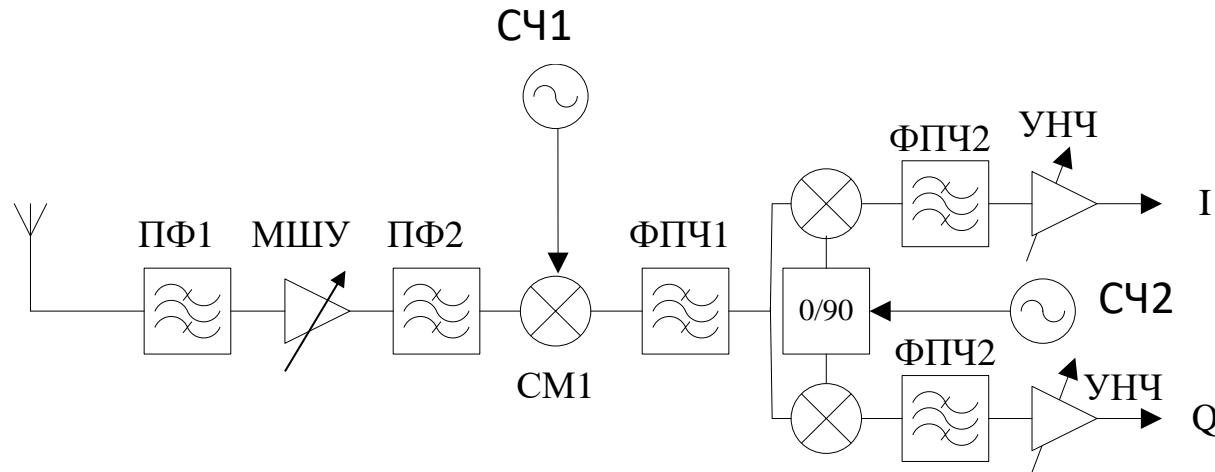


### ПЗ – 3 Выбор и обоснование структурной схемы

#### Супергетеродинный приемник с двукратным преобразованием частоты

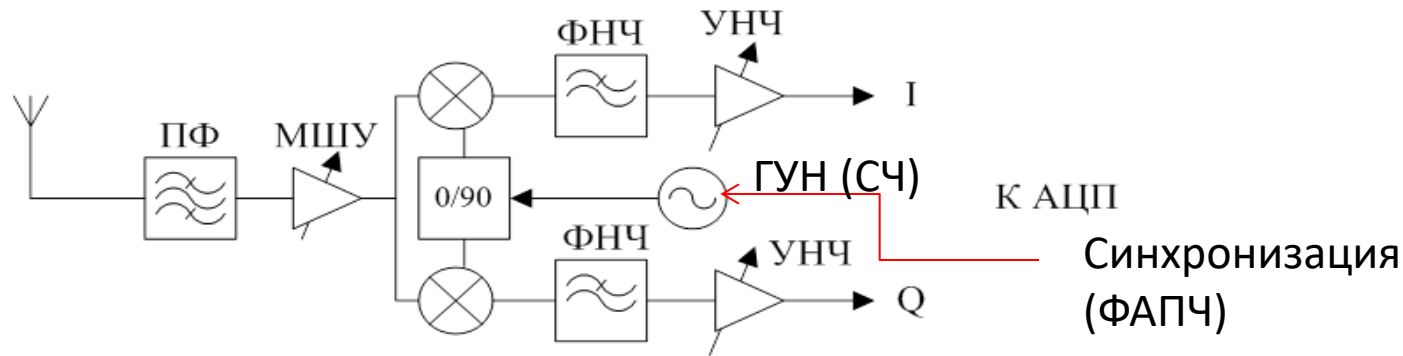


ПФ1 совместно с фильтром ПФ2 ослабляет уровень помех по зеркальному и другим побочным каналам. МШУ обеспечивает заданную чувствительность приемника. ФПЧ1 подавляет внеполосные помехи (частично соседние каналы). ФПЧ1 – основное подавление соседних каналов. СЧ1 – синтезатор частот – обеспечивает заданный диапазон частот, СЧ2 – обеспечивает преобразование на низкую или 0 ПЧ

**Достоинства:** стабильность параметров, высокие значения селективности и чувствительности, большой опыт в разработке и использовании данных схем.

**Недостатки:** увеличение стоимости устройства, его размеров и энергопотребления за счет применения внешних высокочастотных полосовых фильтров, необходимых для подавления зеркального канала и выбора рабочего канала. Сложность микроминиатюризации. Часто абонентский терминал должен работать в нескольких диапазонах и стандартах сотовой связи (например, UMTS, GSM, DCS, PCS). Т.е. приемный тракт будет состоять из нескольких отдельных приемников, работающих в своих диапазонах частот и режимах. Увеличивается число элементов, особенно гетеродинов, что приводит к появлению побочных каналов приёма.

### Приемники с прямым преобразованием (с нулевой промежуточной частотой)

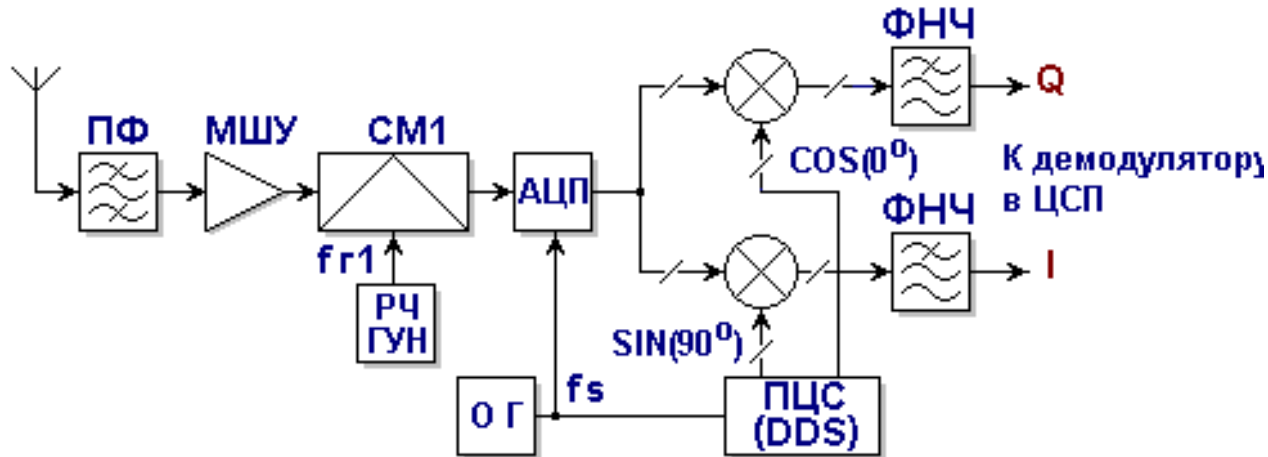


Квадратурный ПЧ осуществляет перенос спектра на две низкочастотных составляющие. Тракты НЧ содержат УНЧ (от постоянного тока) и ФНЧ, осуществляющие основную частотную селекцию полезного сигнала (избирательность по соседнему каналу).

**Достоинства:** предельная простота, малые массогабаритные показатели и энергопотребление, удобство микроминиатюризации (всё, кроме ПФ – ИМС).

**Недостатки:** их много. Рассмотрим подробно позднее, в том числе и меры борьбы

## Приемники с цифровой обработкой на ПЧ



АЦП сигнала ПЧ. В качестве гетеродина на ПЧ используется цифровой синтезатор частот DDS (*Direct Digital frequency Synthesizer*) или генератор с цифровым (программным) управлением NCO (*Numerically Controlled Oscillator*). Это устройство полностью цифровое формирует цифровые выборки двух синусоид с точным сдвигом по фазе на 90 градусов

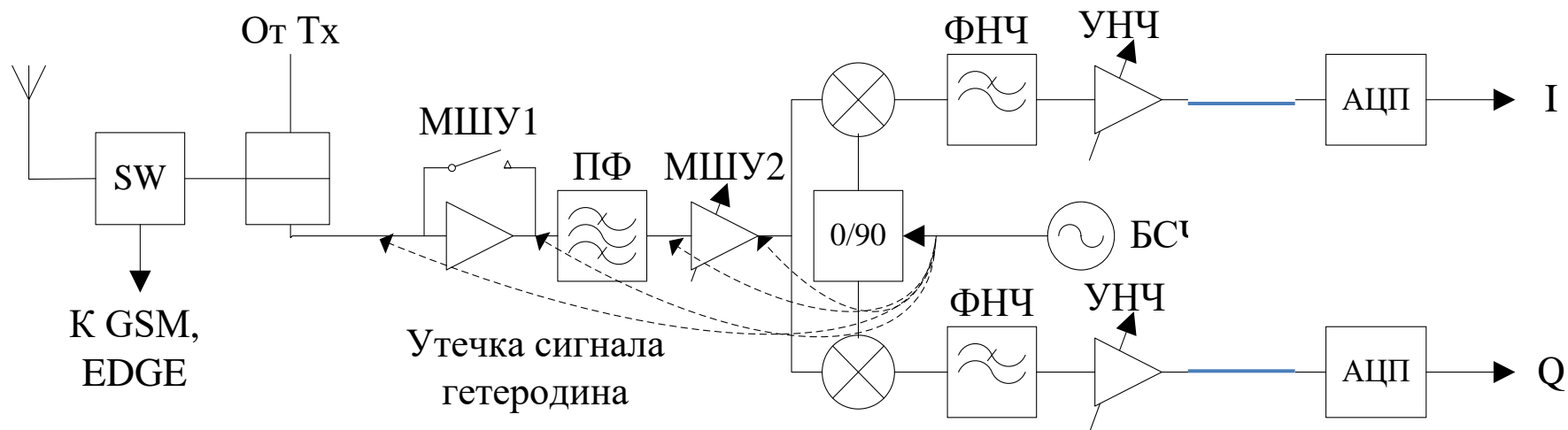
Цифровые выборки входного сигнала от АЦП математически перемножаются с цифровыми выборками синуса и косинуса, поступающими с выхода DDS.

**Достоинства:** цифровые смесители являются практически идеальными устройствами и производят только два выходных сигнала суммарной и разностной частот. Легко избежать проявления разбаланса каналов I и Q, что приводит к хорошему подавлению зеркального канала. Удобно реализовывать многоканальную обработку сигнала в БС (несколько десятков каналов) при высокоскоростном и многоразрядном АЦП

**Недостатки:** требуется применения быстродействующего многоразрядного АЦП и DDS, что приводит к увеличению **энергопотребления, габаритов** всего тракта приема. Спектральные характеристики DDS не всегда позволяют обеспечить требуемый уровень шумов для реализации заданного динамического диапазона

**SFDR – динамический диапазон !**

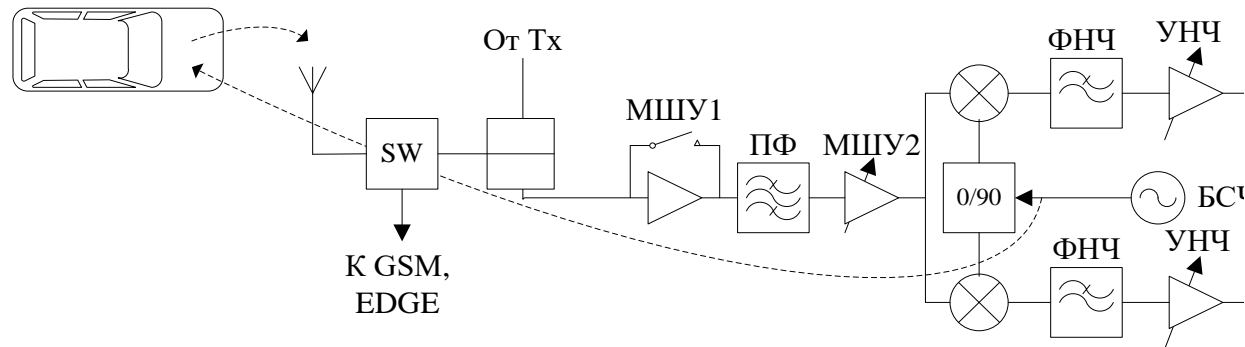
# Недостатки приемника прямого преобразования и методы их устранения



Здесь SW – Электронный переключатель (**только для AC**, тк. нужно поддерживать много стандартов и диапазонов). Для стандартов **GSM** и **TETRA** нужен ещё и для переключения **Rx/Tx** даже в **БС**)

**Утечка сигнала гетеродина** возникает вследствие емкостных связей, связи по подложке и печатной плате между сигнальным и гетеродинным входами смесителя и МШУ. При появлении сигнала утечки на входах МШУ и смесителя, происходит перемножение этого сигнала с сигналом, непосредственно поступающим с гетеродина, приводящее к появлению **постоянной составляющей** на выходе ФНЧ. Наличие постоянной составляющей может привести к **перегрузке УНЧ** и даже к выходу из строя **АЦП**.

# Утечка сигнала гетеродина на антенный вход и его излучение



Излучаемый сигнал гетеродина может быть отражен различными объектами и возвращен в антенну. При этом амплитуда и фаза отраженного сигнала имеют случайные, постоянно меняющиеся значения, что приводит к случайным неустранимым *флуктуациям (дрейфу) величины постоянной составляющей* сигнала на выходе перемножителей.

При тщательной конструктивной и технологической проработке данная проблема становится менее серьезной. Кроме того, использование **дифференциальных** схем гетеродинов и смесителей также позволяет ослабить проблему утечки сигнала гетеродина.

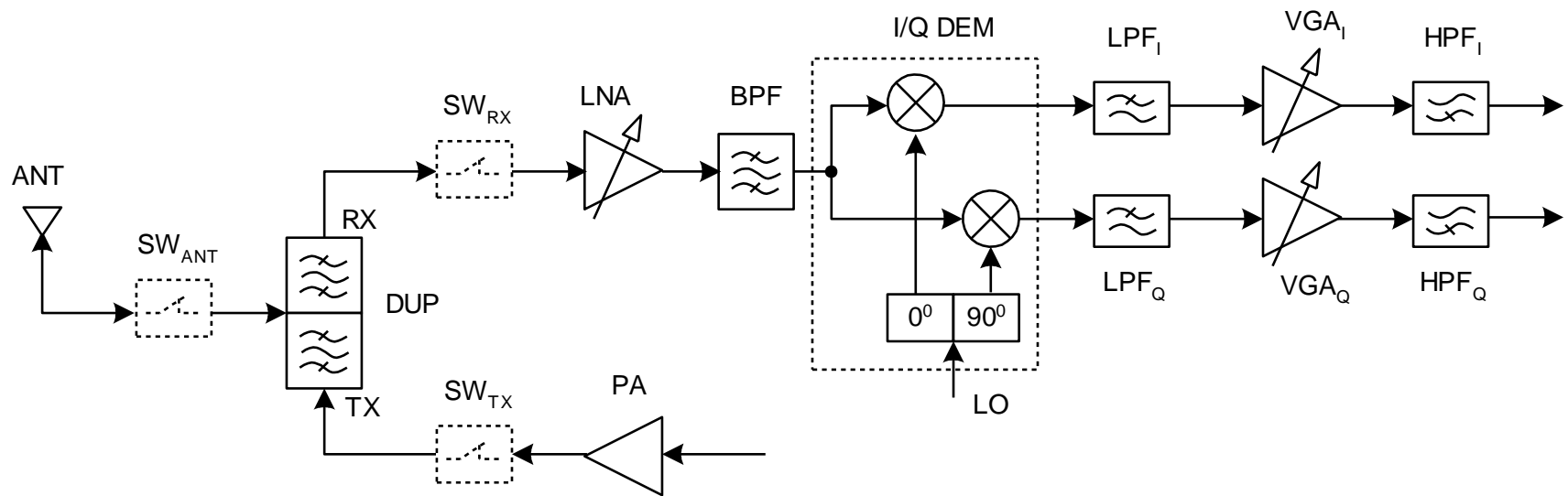
Кардинальным решением проблемы утечки явился переход на синтезаторы частоты с удвоенной рабочей частотой (для UMTS это больше чем 4,2 ГГц). Частота равная частоте входного сигнала получается уже внутри ИМС перемножителя (путем деления на 2), т.о. ее излучение через паразитные цепи практически исчезает.

Дрейф “нуля” в операционных усилителях, паразитное напряжение смещения уровня нуля или смещение постоянной составляющей могут исказить сигнал и, что более важно, перевести последующие каскады в состояние близкое к насыщению. Это явление может возникать, например, из-за влияния на характеристики компонентов тракта усиления окружающей среды и, прежде всего, температуры. Смещение постоянной составляющей возникает и в результате разбаланса дифференциальных (квадратурных) каналов тракта приема, а также неустойчивости амплитуды сигнала гетеродина.

Эффективными и простыми мерами борьбы с рассмотренными явлениями могут быть правильная компоновка компонентов РЧ блока, тщательная экранировка узлов, а также использования компенсации, например, за счёт применения *специальных алгоритмов оценивания и компенсации* с последующей соответствующей реализацией в цифровом блоке обработки (ВВ, ЦОС).

## **Рассмотрим пример реализации приёмника прямого преобразования FDD UMTS**

Для формирования требований к основным узлам приемника прямого преобразования FDD UMTS рассмотрим часть общей структурной схемы приемника AC - UE



Наличие указанных дополнительных ключей в составе универсального UE может быть необходимо для организации различных режимов при работе в распространенных стандартах сотовых систем 2G/3G-поколения (например, вариант UMTS/GSM/PCS), а также для совмещения режимов FDD и TDD. **HPF – ФВЧ, как мера устранения пост. составляющей, уже почти не применяется.**

Согласно стандарту основным интегральным параметром оценки качества проектирования и реализации приемного тракта UE, является **вероятность ошибки на бит (BER)** принимаемых данных, которая должна составлять величину не более  $1 \cdot 10^{-3}$



Именно при такой величине **BER** определяются такие основные параметры как:

- реальная чувствительность приемника;
- допустимый максимальный уровень входного сигнала;
- избирательность по соседнему каналу (**Adjacent Channel Selectivity ACS**);
- минимальный уровень сигналов блокировки приемника при нахождении их частоты внутри и вне рабочей полосы частот;
- влияние нелинейностей приемного тракта, вызывающих интермодуляционные искажения.

Методика измерения, моделирования или расчётов всех перечисленных параметров включает в себя (для статического канала распространения сигнала) следующие основные положения:

1. Формирование входного сигнала канала передачи данных линии "вниз", подаваемого на антенный вход приемника UE включающего в себя:
  - полезный (тестовый) сигнал **DPCH** (информационная скорость данных пользователя 12,2 кбит/с);
  - так называемый "**системный**" шум, связанный с *кодовым разделением сигналов* в рассматриваемой системе WCDMA - на одной несущей частоте от базовой станции кроме DPCH своего абонента излучаются также другие каналы (P-CPICH, P-CCPCH, P-SCH, S-SCH и PICH), а также каналы для других AC; эта "помеха" излучается той же базовой станцией сотовой сети, что и полезный сигнал DPCH;

**Важно!!!** Всё, что связано с *кодовым разделением сигналов и учетом "системного" шума относится только к UMTS! Но не к GSM и TETRA!! Там всё проще*

- одну или несколько модулированных широкополосных помех, подобных по структуре полезному, но отстоящих от него на фиксированный частотный разнос с дискретом 5 МГц (сигналы направления "вниз" от соседних WCDMA базовых станций рассматриваемой сети);
- одну или несколько узкополосных немодулированных помех (**continuous wave CW**), частота которых в общем случае может быть произвольной (сигналы других систем связи).

## 2. Обработку входного сигнала в приемнике FDD UMTS:

- усиление, фильтрация и перенос частоты (в аналоговой части);
- дополнительная фильтрация цифровыми канальными фильтрами, свертка расширяющей псевдослучайной последовательности (**pseudo noise sequence PNS**) и демодуляция полезного сигнала **DPCH** (в цифровой части).

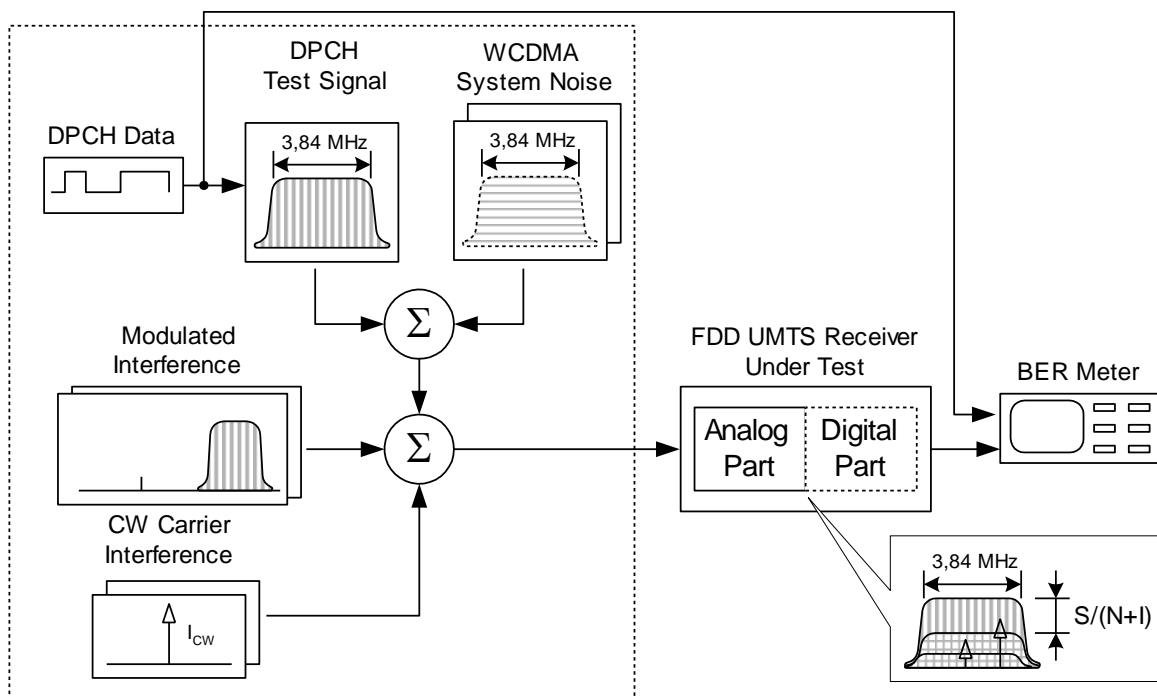


Схема измерения параметров приемника UE

Будем применять для расчётов известные методы тестирования приемного тракта с использованием ряда параметров, косвенно связанных с результирующей BER и не требующих использования (или моделирования) цифровой части приемника:

Величины  $\left( \frac{S}{N + I} \right)_{EFF}$  требуемого эффективного отношения мощности полезного сигнала к суммарной мощности шума и узкополосных помех ( см. рис.) в полосе полезного сигнала на выходе аналоговой части (на входе аналого-цифровых преобразователей Baseband-процессора UE). "Эффективной" данная величина называется вследствие учета неидеальностей реализации дальнейшей свертки **PNS** и демодуляции сигнала DPCH в цифровой части (implementation margin), а также энергетического выигрыша за счет свертки **PNS (processing gain)**. Мощности всех перечисленных сигналов измеряются с помощью взвешивающего фильтра, имеющего АЧХ в виде корня квадратного из поднятого косинуса (**root raised cosine RRC**) с параметром скругления и  $\alpha = 0,22$  полосой пропускания **3,84 МГц**

Использование для оценки параметров приемника величины **EVM** требует привлечения **компьютерного моделирования** формирователя измерительного сигнала и узлов тракта прохождения сигнала. Поэтому переходим к оценке чувствительности.

## РЕАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Реальная чувствительность приемника определяется как минимальный уровень мощности полезного сигнала  $P_{DPCH}$  на входе антенны UE, при котором выходная вероятность ошибки на бит BER стандартного измерительного канала передачи данных не превышает заданной величины  $1 \cdot 10^{-3}$

Задается значение  $P_{DPCH} = -117$  dBm в полосе  $BW = 3,84$  МГц

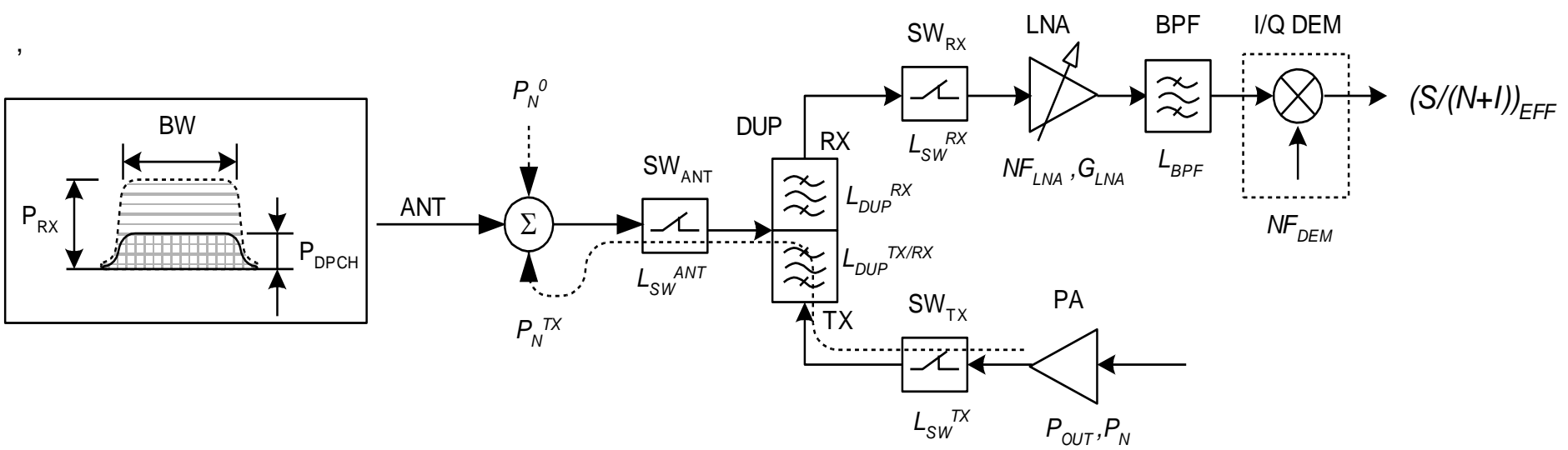
При этом суммарная мощность всех сигналов в этой же полосе составляет  $P_{RX} = -106,7$  dBm. (это только для UMTS!).

Мощность только помеховых составляющих ("системного" шума) (только для UMTS!) на входе приемника можно рассчитать по формуле:

$$P_N^{SYS} = 10 \lg \left( 10^{P_{RX} / 10} - 10^{P_{DPCH} / 10} \right) = -107,1 \text{ dBm}$$

Кроме системных имеется ещё два источника помех :

- 1) аддитивный белый гауссовский шум (Additive White Gaussian Noise AWGN) обусловленный собственными тепловыми шумами каскадов усиления приемника (особенно его входного МШУ - LNA);
- 2) шумовая составляющая шумов передатчика UE в диапазоне принимаемых частот, спектральную плотность которого можно также считать постоянной (только для UMTS т.к. режим FDD!).



Мощности этих помеховых составляющих, пересчитанных к антенному входу UE, рассчитываются, соответственно, как:

$$P_N^0 = NF_{\Sigma} + 10 \lg(k_B T_0 BW) + L_{SW}^{RX} + L_{DUP}^{RX} + L_{SW}^{ANT}$$

$$P_N^{TX} = P_N(BW) - L_{SW}^{TX} - L_{DUP}^{TX/RX} - L_{SW}^{ANT}$$

Где  $NF_{\Sigma}$  суммарный коэффициент шума приемного тракта,  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/Гц·°К

– постоянная Больцмана,  $T_0 = 273$  °К – стандартная комнатная температура,

$L_{SW}^{RX}$   $L_{SW}^{TX}$   $L_{SW}^{ANT}$  - затухание сигнала в ключах приема, передачи и антенны, соответственно,

$L_{DUP}^{RX}$  - затухание в дуплексере между выводами "ANT – RX" в диапазоне частот приема,

$L_{DUP}^{TX/RX}$  - затухание в дуплексере между выводами "TX – ANT" в диапазоне частот приема.

все **размерные** величины измеряются в **dBm**, а **безразмерные** – в **dB**

$$10 \lg(k_B T_0 BW) = -108,4 \text{ dBm}$$

Суммарный коэффициент шума приемного тракта определяется в основном коэффициентом шума входного малошумящего усилителя  $NF_{LNA}$ , однако, с учетом сравнительно небольшого коэффициента его усиления  $G_{LNA}$  (типовое значение составляет около 10..15 дБ), необходимо учитывать наличие последующего полосового фильтра с коэффициентом передачи в полосе пропускания  $L_{BPF}$  и смесителей квадратурного преобразователя с коэффициентом шума  $NF_{DEM}$  (на рис. показан только один из них). Таким образом

$$NF_{\Sigma} \approx 10 \lg \left( 10^{NF_{LNA}/10} + \frac{10^{NF_{DEM}/10} - 1}{10^{(G_{LNA} - L_{BPF})/10}} \right)$$

Результирующее отношение "сигнал/шум + помеха" на антенном входе UE:

$$\frac{S}{N + I} = P_{DPCH} - 10 \lg \left( 10^{P_N^{SYS}/10} + 10^{P_N^0/10} + 10^{P_N^{TX}/10} \right)$$

Для стандартов GSM и TETRA это **S/N**, т.е. учитывать только тепловой шум -  $P_N^0$

Для перехода к эффективному значению необходимо учитывать запас на неточности реализации цифровой части (**implementation margin**) и энергетический выигрыш вследствие свертки **PNS (processing gain)**. Первая из этих величин обычно задается из эмпирических соображений (empirically) и составляет около  $L_{IM} \approx 2,0 \text{ dB}$

а вторая отношению ширины спектра сигнала WCDMA и полосы полезного информационного сигнала после свертки:

$$G_{PG} = 10 \lg \frac{BW}{R_{DATA}} = 25,0 \text{ dB} \quad \text{Для стандартов GSM и TETRA учесть только } L_{IM} \approx 2 \text{ dB}$$

Таким образом

$$\left( \frac{S}{N+I} \right)_{EFF} = \frac{S}{N+I} - L_{IM} + G_{PG}$$

Из результатов исследования спектральных характеристик РПДУ получена мощность собственных шумов передатчика в диапазоне частот приема (только для UMTS!).

$P_N(BW) \approx -70 \text{ dBm}$ . Это для UE (AC) с мощностью +30дБм. Для БС больше на .....дБ

Исходя из параметров типовых дуплексеров (например, DFYK1R95C2R14LHG фирмы Murata) и антенного ключа (например, SW-488 фирмы M/A-COM) имеем:

$$L_{DUP}^{TX/RX} \approx 45 \text{ dB}, \quad L_{DUP}^{RX} \approx 1,5 \text{ dB}, \quad L_{SW}^{ANT} \approx 0,9 \text{ дБ}.$$

$$L_{SW}^{RX} = L_{SW}^{TX} \approx 0,9 \text{ дБ}.$$

В качестве примера типовых значений параметров ИМС и пассивных элементов рассматриваемого диапазона частот ведущих производителей этих компонентов возьмём величины:

$$NF_{LNA} \approx 1,5 \text{ dB}, \quad G_{LNA} \approx 10 \text{ dB}, \quad L_{BPF} \approx 3,5 \text{ dB}, \quad NF_{DEM} \approx 13 \text{ dB}.$$

Подстановка приведенных величин в соответствующие формулы и расчет определяет величину расчетного эффективного отношения "сигнал/шум + помеха" значением

$$\left( \frac{S}{N + I} \right)_{EFF} \approx 3,1 \text{ дБ}$$

NF_LNA	1,5	dB	NF_SUM	7,5	dB	S/N+I	-19,9	dB
	1,41			5,66				
G_LNA	10,0	dB				S/N+I_EFF	3,1	dB
	10,00							
L_BPF	3,5	dB						
	2,24							
NF_DEM	13,0	dB						
	19,95		P_N_SYS	-107,1	dBm			
				1,94E-11	mW			
L_SW_RX	0,9	dB	P_N_0	-97,6	dBm			
L_SW_TX	0,9	dB		1,75E-10	mW			
L_SW_ANT	0,9	dB	P_N_TX	-117,8	dBm			
L_DUP_RX	1,5	dB		1,66E-12	mW			
L_DUP_TX(RX)	45,0	dB						
			P_N	-97,1	dBm			
P_DPCH	-117,0	dBm		1,96E-10	mW			
	2,00E-12	mW						
P_RX	-106,7	dBm						
	2,14E-11	mW						
P_N(BW)	-71,0	dBm						
L_IM	2,0	dB						
G_PG	25,0	dB						

Пример расчета эффективного отношения "сигнал/шум + помеха" для LNA с коэффициентом усиления **10 дБ**.

Сравнение полученного значения с требуемым для достижения заданного значения вероятности ошибки  **$E_B/N_0 = 5,2 \text{ дБ}$**  показывает, что представленная совокупность параметров не реализует заданную реальную чувствительность.



Анализ показывает, что основной вклад в шумы, приведенные ко входу антенны приемника вносит их составляющая, обусловленная суммарным коэффициентом шума (при данном сочетании параметров  $NF_{\Sigma} \approx 7,52$  dB).

Для его уменьшения требуется использование LNA с **бо'льшим** коэффициентом усиления. Повторный анализ при  $G_{LNA} = 15$  dB приводит к **выполнению требования о реальной чувствительности приемника** при приведенной выше совокупности параметров, причем с запасом около 0,5 dB.

NF_LNA	1,5	dB	NF_SUM	4,4	dB	S/N+I	-17,3	dB
	1,41			2,75		S/N+I_EFF	5,7	dB
G_LNA	15,0	dB						
	31,62							
L_BPF	3,5	dB						
	2,24							
NF_DEM	13,0	dB						
	19,95		P_N_SYS	-107,1	dBm			
				1,94E-11	mW			
L_SW_RX	0,9	dB	P_N_0	-100,7	dBm			
L_SW_TX	0,9	dB		8,51E-11	mW			
L_SW_ANT	0,9	dB	P_N_TX	-117,8	dBm			
L_DUP_RX	1,5	dB		1,66E-12	mW			
L_DUP_TX(RX)	45,0	dB						
			P_N	-99,7	dBm			
P_DPCH	-117,0	dBm		1,06E-10	mW			
	2,00E-12	mW						
P_RX	-106,7	dBm						
	2,14E-11	mW						
P_N(BW)	-71,0	dBm						
L_IM	2,0	dB						
G_PG	25,0	dB						