

УСТРОЙСТВА ГЕНЕРИРОВАНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

Лекция 10. Двойной балансный смеситель

Плутешко Андрей Владимирович, PluteshkoAV@mpei.ru

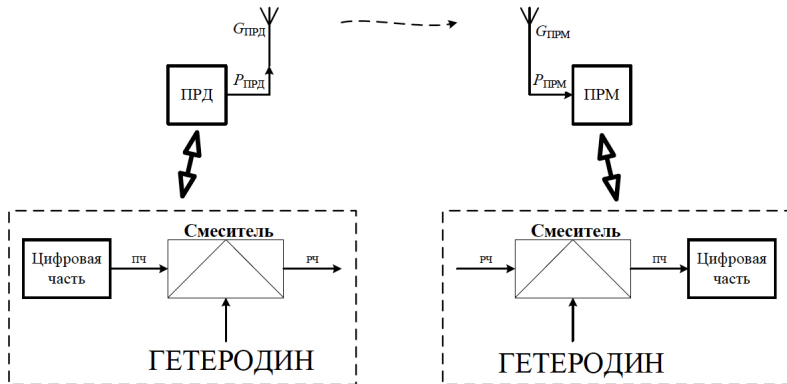
Содержание и обозначения

1 Двойной балансный смеситель

- ДБС - двойной балансный смеситель
- РЧ – радиочастота
- ПЧ – промежуточная частота
- ПС – побочная составляющая (в спектре); в ГОСТе: побочное колебание
- $L = \frac{P_{\text{вх}}(f_1)}{P_{\text{вых}}(f_2)}$ – потери преобразования (conversion loss) частоты f_1 в f_2 (практически всегда в децибелах:
 $10 \lg \left(\frac{P_{\text{вх}}(f_1)}{P_{\text{вых}}(f_2)} \right)$)
- дБн – относительный уровень мощности в децибелах относительно несущей

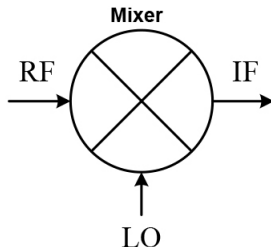
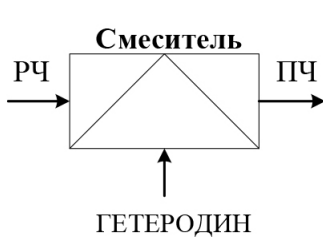
Двойной балансный смеситель

Перенос сигнала с одной частоты на другую с помощью смесителя. Модуляция



Двойной балансный смеситель

Условные обозначения смесителей ("модулятор" по ЕСКД)



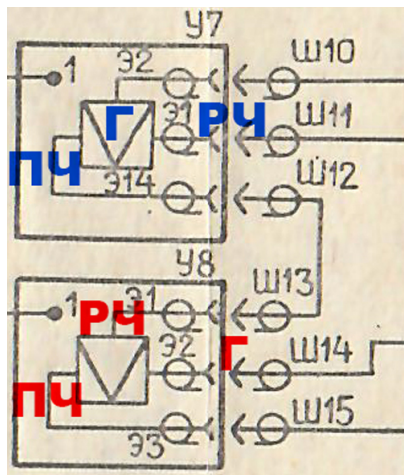
Двойной балансный смеситель

Смесители. Терминология 1

- смеситель (mixer), входы и выходы:
 - ① вход или выход радиочастоты (РЧ): $f_{\text{РЧ}}$ (radio frequency (RF))
 - ② вход или выход промежуточной частоты (ПЧ): $f_{\text{ПЧ}}$ (intermediate frequency (IF))
 - ③ вход гетеродина (Г): $f_{\text{Г}}$ (local oscillator (LO))
- преобразование частоты (frequency conversion):
 - ① вниз (downconversion): РЧ вход, ПЧ выход
 - ② вверх (upconversion): ПЧ вход, РЧ выход
- часто $f_{\text{ПЧ}} \ll f_{\text{РЧ}}$, $f_{\text{ПЧ}} \ll f_{\text{Г}}$, $f_{\text{РЧ}} \approx f_{\text{Г}}$

Двойной балансный смеситель

Условные обозначения смесителей. Фрагмент блока преобразователя анализатора спектра С4-60



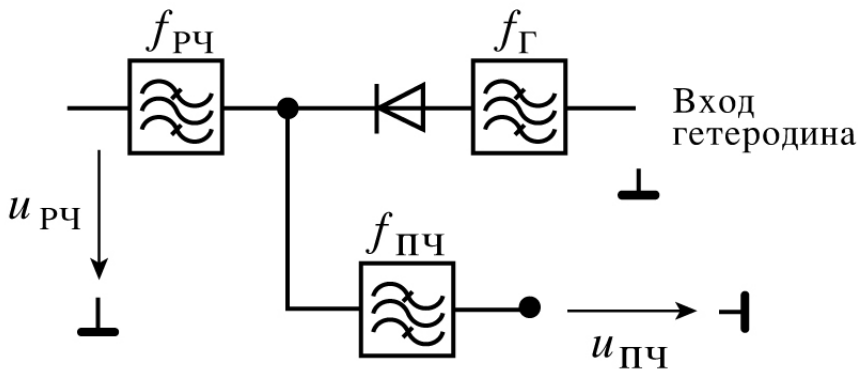
Двойной балансный смеситель

Смесители. Терминология 2

- виды смесителей по использованию питания от источника постоянного тока:
 - ① пассивные
 - ② активные
- виды смесителей по элементной базе:
 - ① диодные
 - ② транзисторные
- виды схем смесителей:
 - ① одноконтурные
 - ② балансные (single balanced)
 - ③ двойные балансные (double balanced)

Двойной балансный смеситель

Ранние смесители – одноконтные (один диод)



Двойной балансный смеситель

Ранние смесители

- принцип работы:

- 1 на нелинейный элемент (точечно-контактный диод) подаются колебания с частотами $f_{РЧ}$ и $f_{Г}$
- 2 в общем случае в спектре содержатся колебания с комбинационными частотами $|nf_{Г} \pm mf_{РЧ}|$ ($n, m \in \mathbb{Z}$)
- 3 одно из них ($n = 1; m = -1$ или $n = -1; m = 1$) выделяют с помощью частотно-избирательных цепей
- 4 в линейном режиме работы мощность гетеродина значительно превышает мощности РЧ и ПЧ

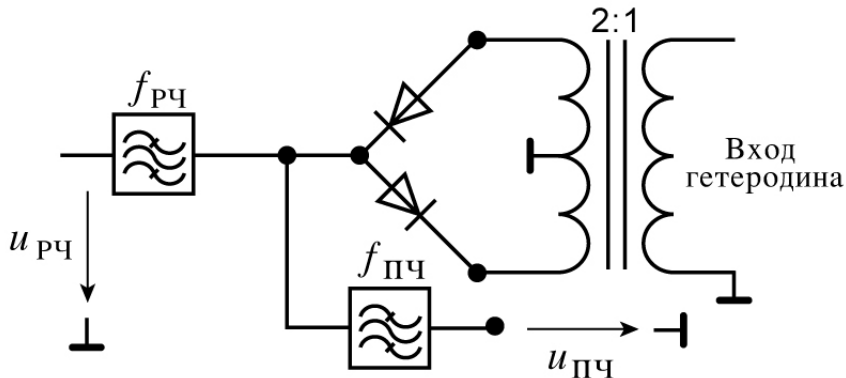
Двойной балансный смеситель

Ранние смесители. Анализ

- особенности:
 - ① однотоковые: использование одного диода
 - ② развязка между входами и выходом обеспечивается частотно-избирательными цепями
- недостаток:
 - ① малая развязка гетеродина и РЧ: в первую очередь просачивание мощности гетеродина (LO leakage) в антенну

Двойной балансный смеситель

Ранние смесители. Балансный смеситель – два диода



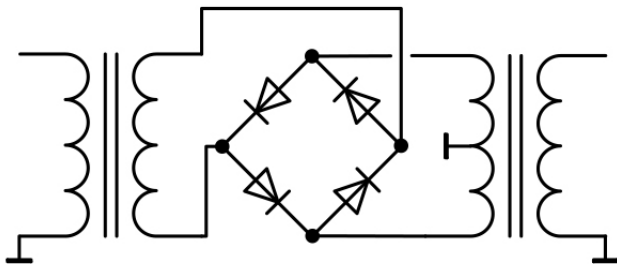
Двойной балансный смеситель

Балансный смеситель. Свойство

- развязка между входом гетеродина и цепями РЧ и ПЧ обеспечивается симметричностью схемы (диодов и коэффициентов трансформации напряжения)

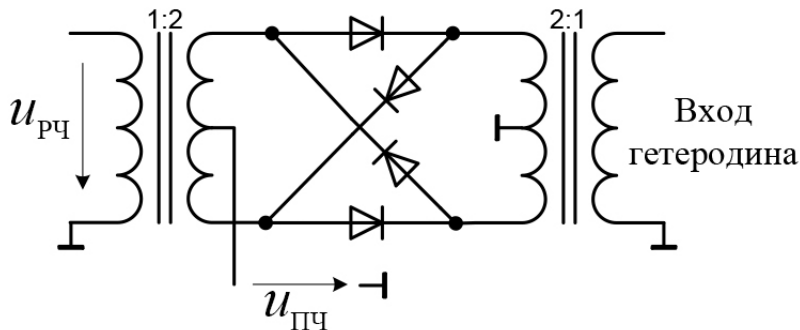
Двойной балансный смеситель

ДБС. Схема (повсеместно распространённое изображение)



Двойной балансный смеситель

ДБС. Схема (более понятное изображение)



Двойной балансный смеситель

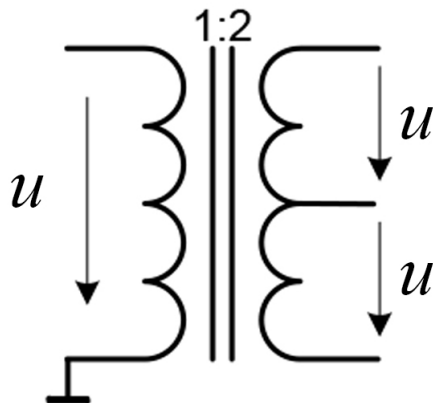
Принцип работы при отсутствии омических потерь

- одинаковые обмотки
- одинаковые диоды
- отсутствие потерь в трансформаторах и диодах
- мгновенное переключение диодов током гетеродина
- частотно независимые действительные импедансы генераторов и нагрузок

Устройство, описываемое этой моделью, будем называть **широкополосный двойной балансный смеситель (ДБС)**.

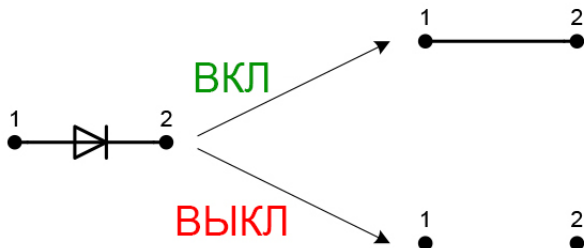
Двойной балансный смеситель

Трансформаторы 1:2



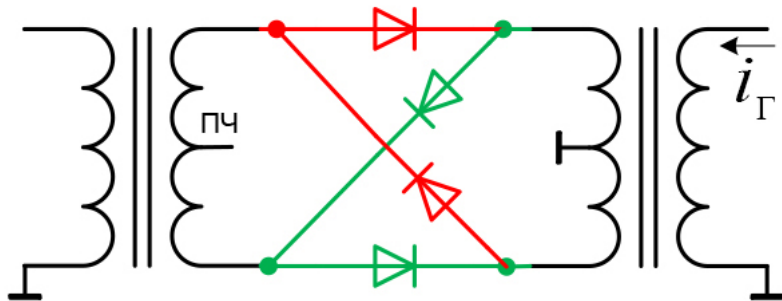
Двойной балансный смеситель

Эквивалентная схема диода-переключателя



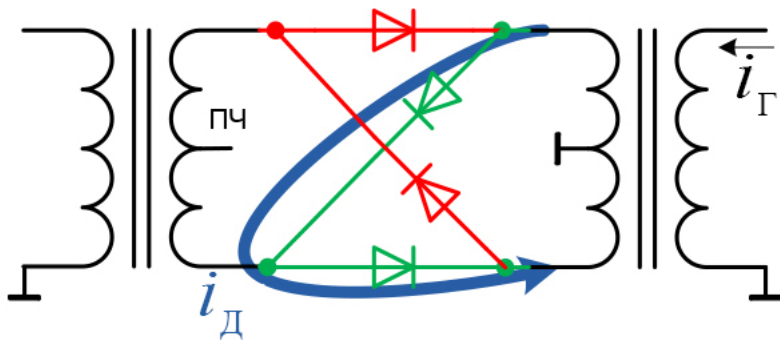
Двойной балансный смеситель

Включена только одна пара диодов в каждый момент времени



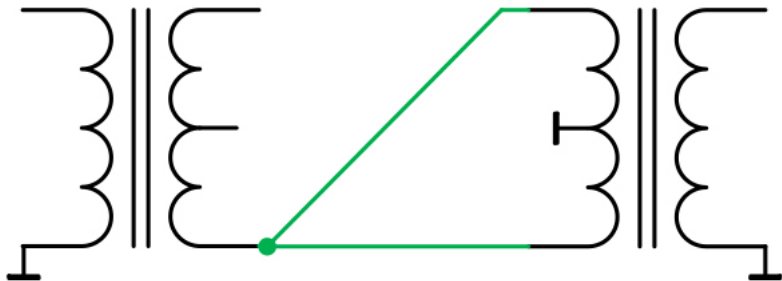
Двойной балансный смеситель

Через ВКЛ диоды течёт значительный ток. Положительный полупериод ГЕТ. Чему равно напряжение в точке соединения ВКЛ диодов (относительно “земли”)?



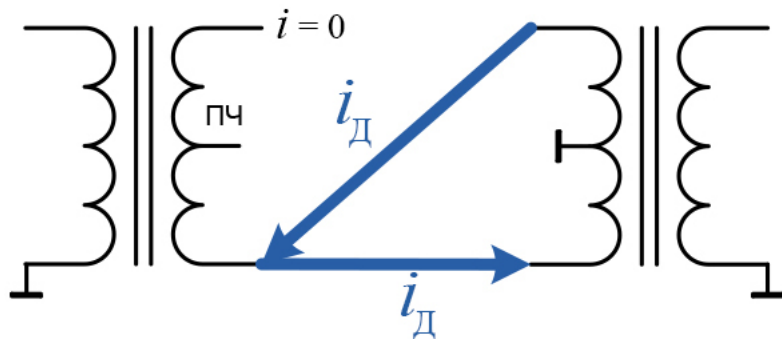
Двойной балансный смеситель

Эквивалентная схема ДБС в течение положительного полупериода ГЕТ



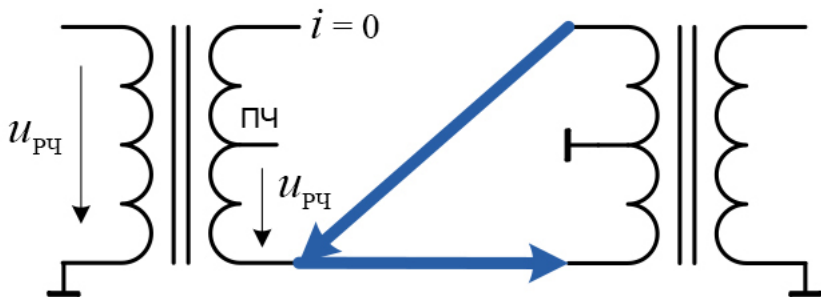
Двойной балансный смеситель

В одной половине вторичной обмотки ток не протекает



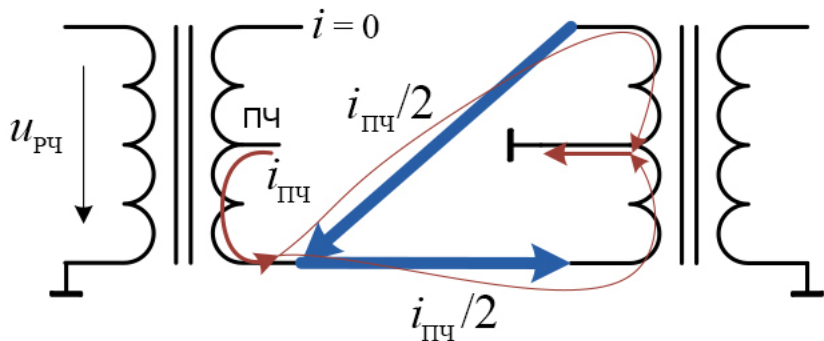
Двойной балансный смеситель

Колебание РЧ проявит себя в другой половине вторичной обмотки



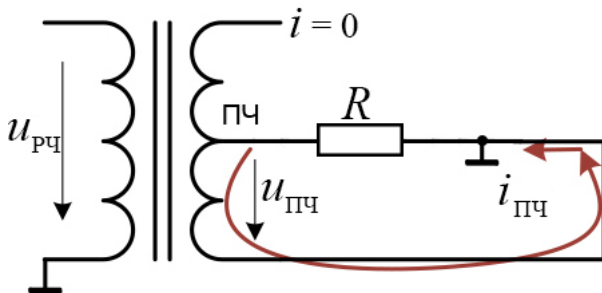
Двойной балансный смеситель

Токи ПЧ и ГЕТ в течение положительного полупериода ГЕТ



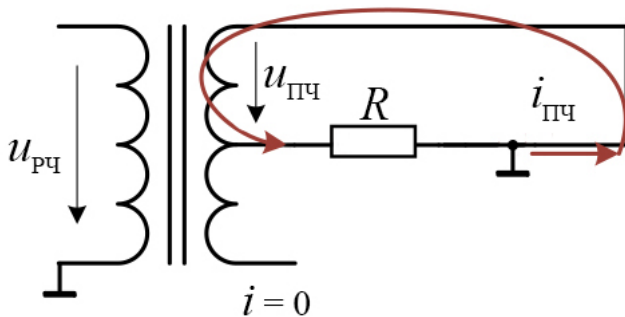
Двойной балансный смеситель

Эквивалентная схема ДБС для тока ПЧ в течение положительного полупериода ГЕТ



Двойной балансный смеситель

Эквивалентная схема ДБС для тока ПЧ при **отрицательного** полупериода ГЕТ



Двойной балансный смеситель

Потери преобразования широкополосного ДБС: $\omega_{\Gamma} - \omega_{\text{PC}} = \omega_{\text{ПЧ}}$

- $u_{\text{PC}}(t) = U_{\text{PC}} \cos \omega_{\text{PC}} t$
- $u_{\text{ПЧ}}(t) = U_{\text{PC}} \cos \omega_{\text{PC}} t \cdot \text{sgn}(\cos \omega_{\Gamma} t) = U_{\text{PC}} \cos \omega_{\text{PC}} t \left(\frac{4}{\pi} \cos \omega_{\Gamma} t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_{\Gamma} t + \dots \right)$
- $u_{\text{ПЧ}}(t) = \frac{2}{\pi} U_{\text{PC}} (\cos(\omega_{\Gamma} - \omega_{\text{PC}}) t + \cos(\omega_{\Gamma} + \omega_{\text{PC}}) t) + \dots$
- $u_{\text{ПЧ}}(t) = \frac{2}{\pi} U_{\text{PC}} \cos \omega_{\text{ПЧ}} t + \dots = U_{\text{ПЧ}} \cos \omega_{\text{ПЧ}} t + \dots \Rightarrow$

$$U_{\text{ПЧ}} = \frac{2}{\pi} U_{\text{PC}}$$

$$L = \frac{P_{\text{вх}}(f_{\text{PC}})}{P_{\text{вых}}(f_{\text{ПЧ}})} = \frac{P_{\text{PC}}}{P_{\text{ПЧ}}} - \text{потери преобразования ?}$$

Двойной балансный смеситель

Потери преобразования

- мощности выделяются на одном и том же сопротивлении
- значит, $\frac{P_{РЧ}}{P_{ПЧ}} = \left(\frac{U_{РЧ}}{U_{ПЧ}} \right)^2 = \frac{\pi^2}{4} \approx 2,47$
- $10 \lg \frac{P_{РЧ}}{P_{ПЧ}} = 3,9$ дБ

Двойной балансный смеситель

Полное выражение

- $sgn(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$
- $u_{ПЧ}(t) = u_{РЧ}(t) sgn(\cos \omega_{\Gamma} t)$ – преобразование частоты вниз
- $u_{РЧ}(t) = u_{ПЧ}(t) sgn(\cos \omega_{\Gamma} t)$ – преобразование частоты вверх
- $sgn(\cos \omega_{\Gamma} t) = \frac{4}{\pi} \cos \omega_{\Gamma} t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_{\Gamma} t + \dots$

Двойной балансный смеситель

Побочные составляющие в спектре колебания произвольного смесителя

- в общем случае в спектре содержатся колебания с комбинационными частотами $|nf_{\Gamma} \pm mf_{\Pi\text{Ч}}|$ или $|nf_{\Gamma} \pm mf_{\Pi\text{Ч}}|$ ($n, m \in \mathbb{Z}$)
- такие колебания будем обозначать парой чисел $\{n; \pm m\}$
- одно из них считают полезным (чаще всего $|n| = |m| = 1$)
- остальные колебания считают **побочными составляющими** (спектра) (или **побочными колебаниями**)
- в англоязычной литературе этому понятию соответствует понятие **spurious**

Двойной балансный смеситель

Спектр на выходе широкополосного ДБС

- в спектре на выходе широкополосного ДБС содержатся колебания не всех комбинационных частот вида $|nf_{\Gamma} \pm mf_{ПЧ}|$ ($n, m \in \mathbb{Z}$)
- $u_{рч}(t) = \frac{2}{\pi} U_{ПЧ} (\cos(\omega_{\Gamma} - \omega_{ПЧ})t + \cos(\omega_{\Gamma} + \omega_{ПЧ})t) - \frac{2}{3\pi} U_{ПЧ} (\cos(3\omega_{\Gamma} - \omega_{ПЧ})t + \cos(3\omega_{\Gamma} + \omega_{ПЧ})t) + \dots$
- $\{n; \pm 1\}$, где n – нечётное;
- относительный уровень: $-10 \lg n^2 = -20 \lg n$

Двойной балансный смеситель

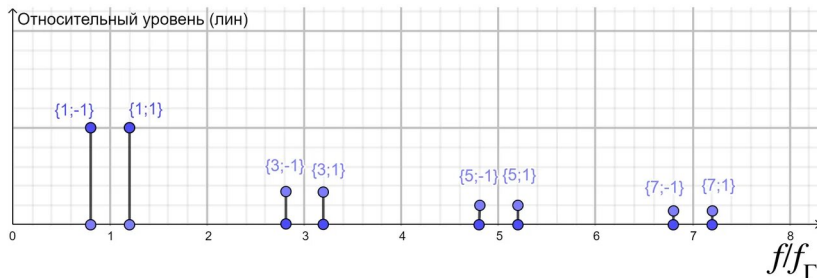
Децибелы применительно к побочным составляющим: дБн(есущая)

- побочное колебание характеризуют уровнем его мощности $P_{\text{пбч}}$ относительно мощности полезного колебания или **несущей** (carrier) $P_{\text{нес}}$
- отсюда наименование единицы измерения такой величины: дБн (децибелы относительно несущей; dBc)

$$10 \lg \left(\frac{P_{\text{пбч}}}{P_{\text{нес}}} \right)$$

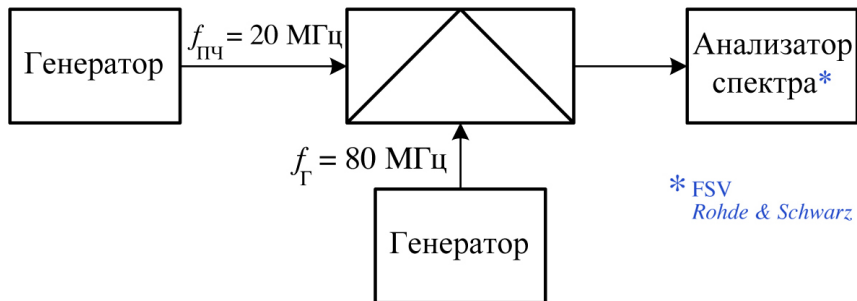
Двойной балансный смеситель

Спектр на выходе широкополосного ДБС. Преобразование вверх



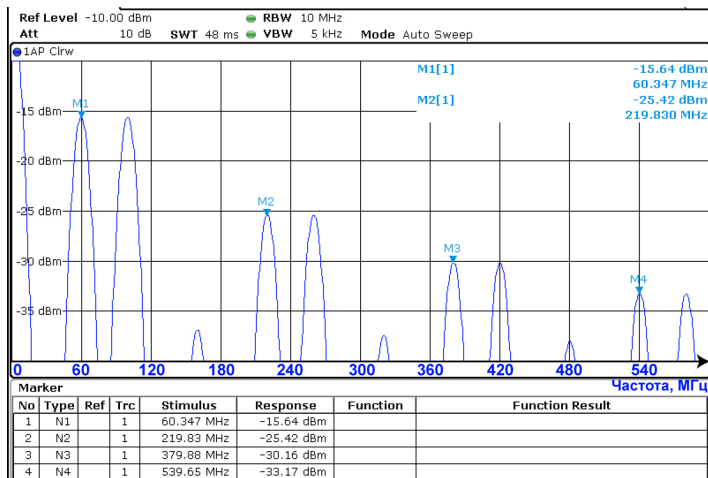
Двойной балансный смеситель

Схема измерения 1



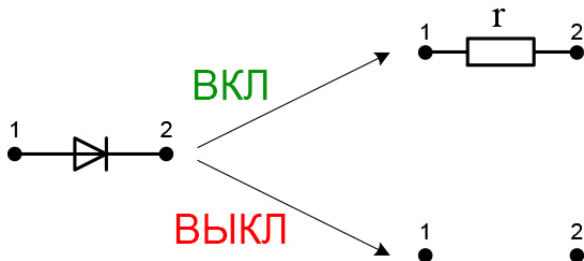
Двойной балансный смеситель

Спектр на выходе широкополосного ДБС. Схема измерения 1. $f_r = 80\text{ МГц}$; $f_{пч} = 20\text{ МГц}$. $P_{пч} = -9,3\text{ дБм}$



Двойной балансный смеситель

Потери в диодах и другие потери



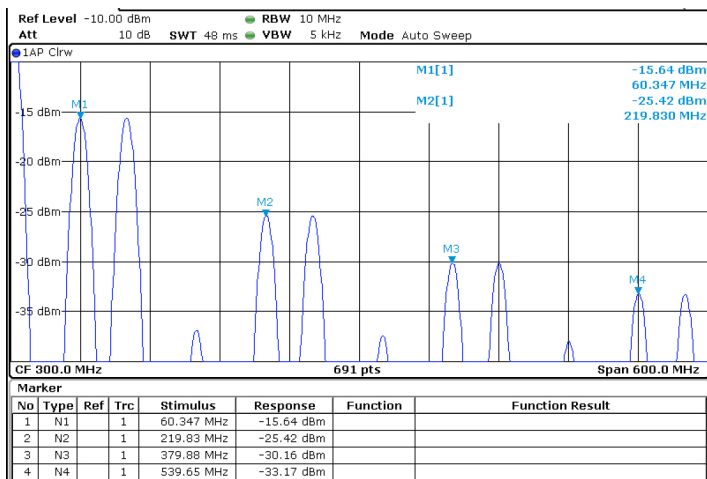
Двойной балансный смеситель

Задачи по экрану анализатора спектра

- CF – центральная частота
- Span – диапазон отображаемых частот
- Start – нижняя частота диапазона отображаемых частот
- Stop – верхняя частота диапазона отображаемых частот
- логарифмический масштаб по мощности, в дБм

Двойной балансный смеситель

Спектр на выходе широкополосного ДБС. Расшифровка данных анализатора спектра.
 $f_r = 80 \text{ МГц}$; $f_{пч} = 20 \text{ МГц}$



Двойной балансный смеситель

Побочные составляющие (ПС) на выходе ДБС

- 1 из-за идеального переключения
- 2 из-за несимметричности диодов и обмоток трансформаторов
- 3 из-за неширокополосности нагрузок
- 4 из-за нелинейности

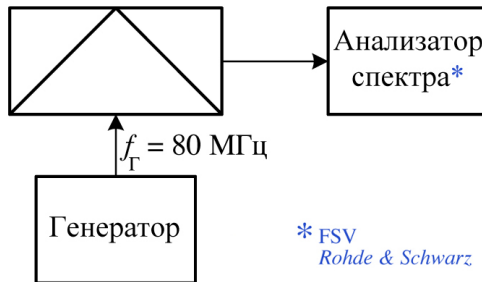
Двойной балансный смеситель

ПС из-за несимметричности

- главные представители (по величине относительного уровня мощности):
 - 1 $\{1; 0\}$ – просачивание мощности гетеродина
 - 2 $\{n; 0\}$ – гармоники гетеродина
 - 3 $\{0; 1\}$

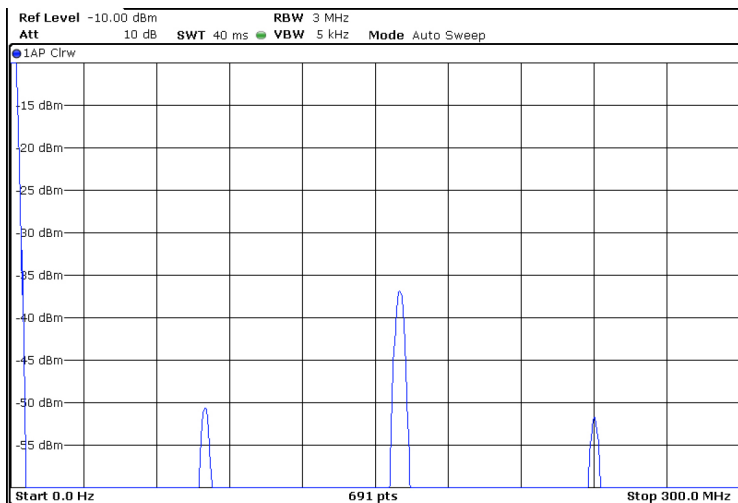
Двойной балансный смеситель

Схема измерения 2



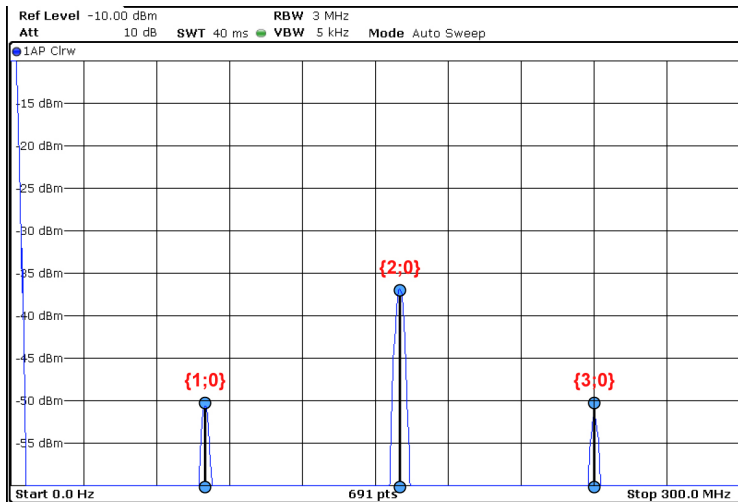
Двойной балансный смеситель

ПС из-за несимметричности. Схема измерения 2



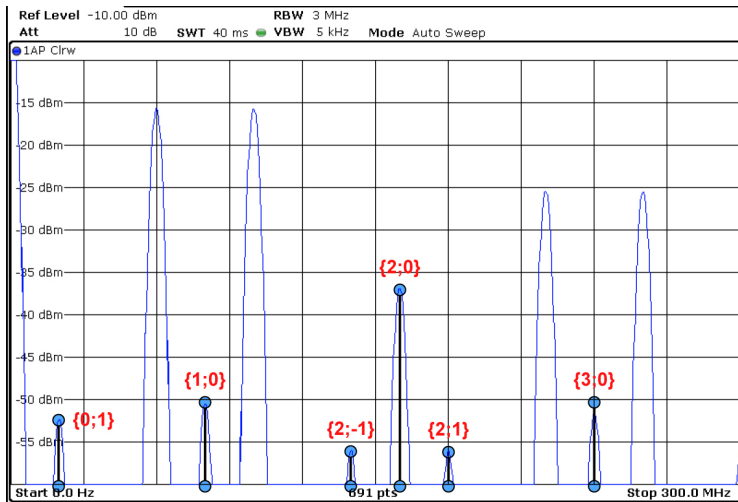
Двойной балансный смеситель

ПС из-за несимметричности. Схема измерения 2. $f_r = 80\text{ МГц}$



Двойной балансный смеситель

ПС из-за несимметричности. Схема измерения 1. $f_r = 80\text{ МГц}$; $f_{\text{ПЧ}} = 20\text{ МГц}$



Двойной балансный смеситель

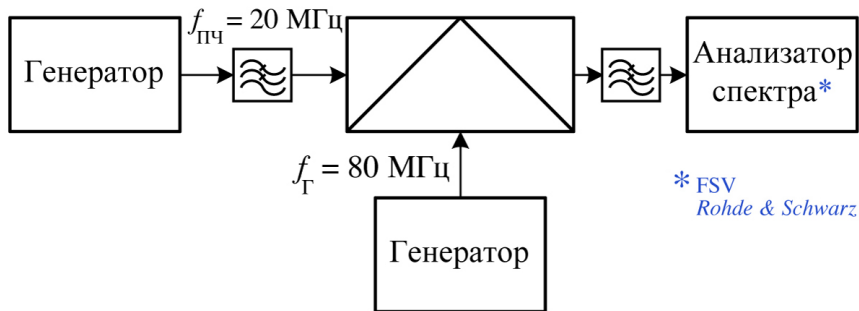
ПС из-за неширокополосности нагрузок

- основные ПС:

- 1 $\{n; \pm 1\}$, где n – чётное;

Двойной балансный смеситель

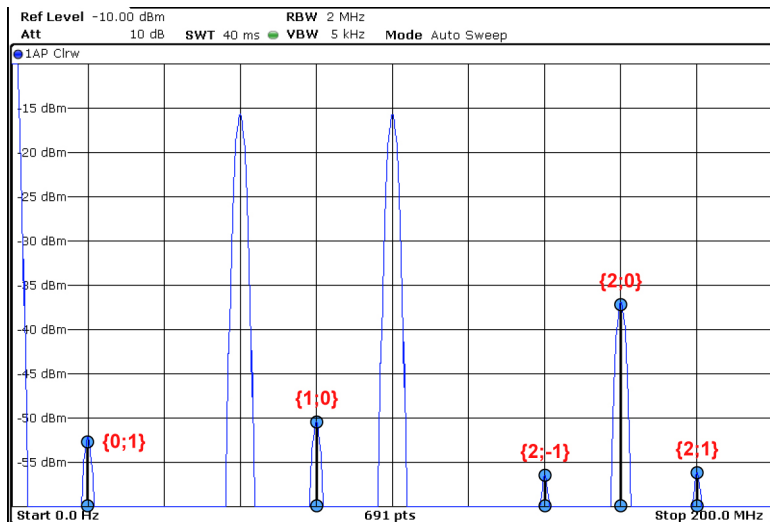
Схема измерения 3



* FSV
Rohde & Schwarz

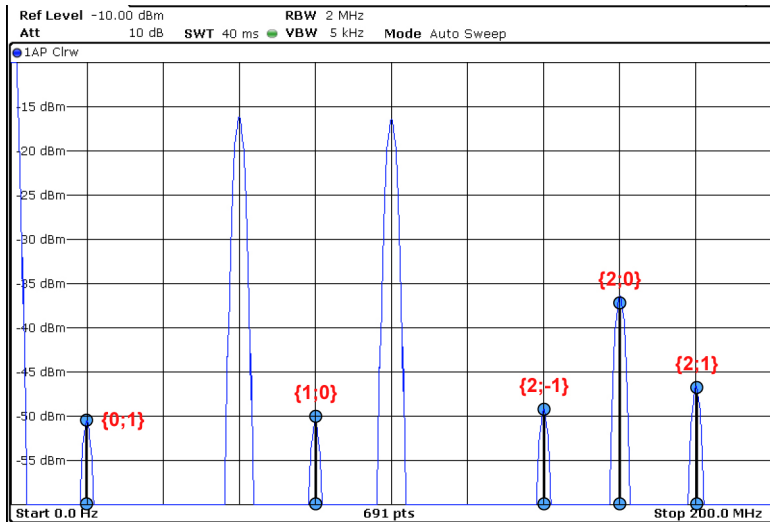
Двойной балансный смеситель

ПС из-за неширокополосности нагрузок. Схема 1. $f_r = 80\text{ МГц}$; $f_{пч} = 20\text{ МГц}$



Двойной балансный смеситель

ПС из-за неширокополосности нагрузок. Схема 3. $f_r = 80\text{ МГц}$; $f_{пч} = 20\text{ МГц}$



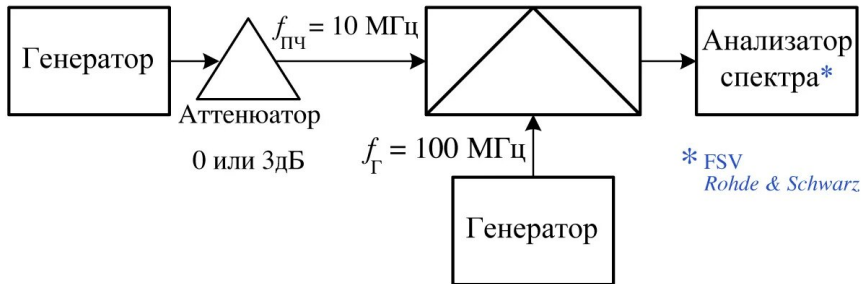
Двойной балансный смеситель

ПС из-за нелинейности

- ① $\{n; \pm m\}$, где $m > 1$
 - в ряде Тейлора присутствуют члены вида $u_r^n u_{\Pi\text{Ч}}^m$
 - они порождают ПС вида $\{n; \pm m\}$ с амплитудами пропорциональными $U_{\Pi\text{Ч}}^m$

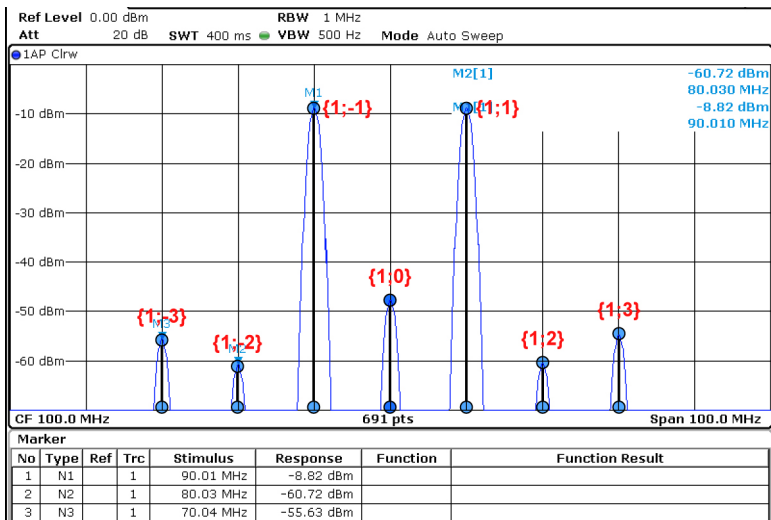
Двойной балансный смеситель

Схема измерения 4



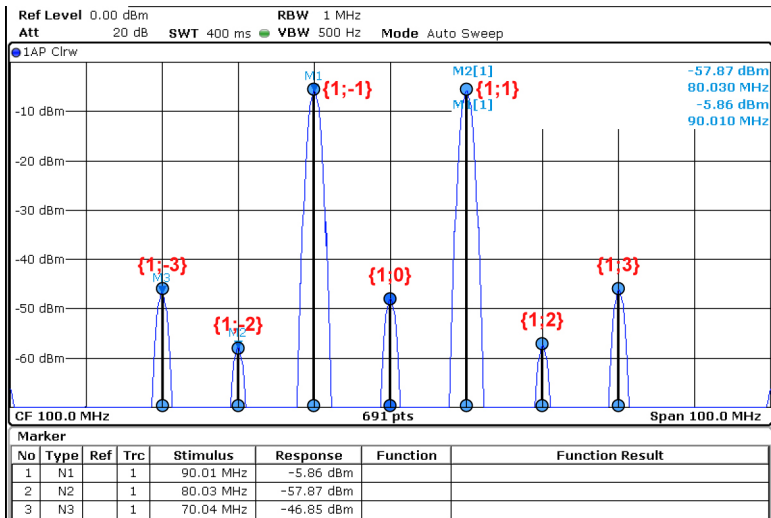
Двойной балансный смеситель

ПС из-за нелинейности. Схема 4: затухание 3 дБ. $f_r = 100\text{ МГц}$; $f_{\text{ПЧ}} = 10\text{ МГц}$



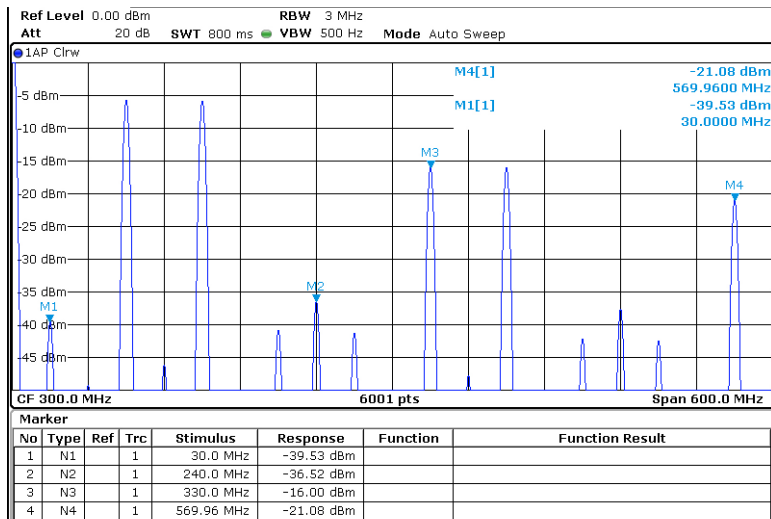
Двойной балансный смеситель

ПС из-за нелинейности. Схема 4: затухание 0 дБ. $f_r = 100\text{ МГц}$; $f_{\text{ПЧ}} = 10\text{ МГц}$



Двойной балансный смеситель

Задача. Дано



Двойной балансный смеситель

Задача. Вопросы по спектру

- 1 Найти f_r и $f_{пч}$
- 2 Какие составляющие отмечены маркерами?