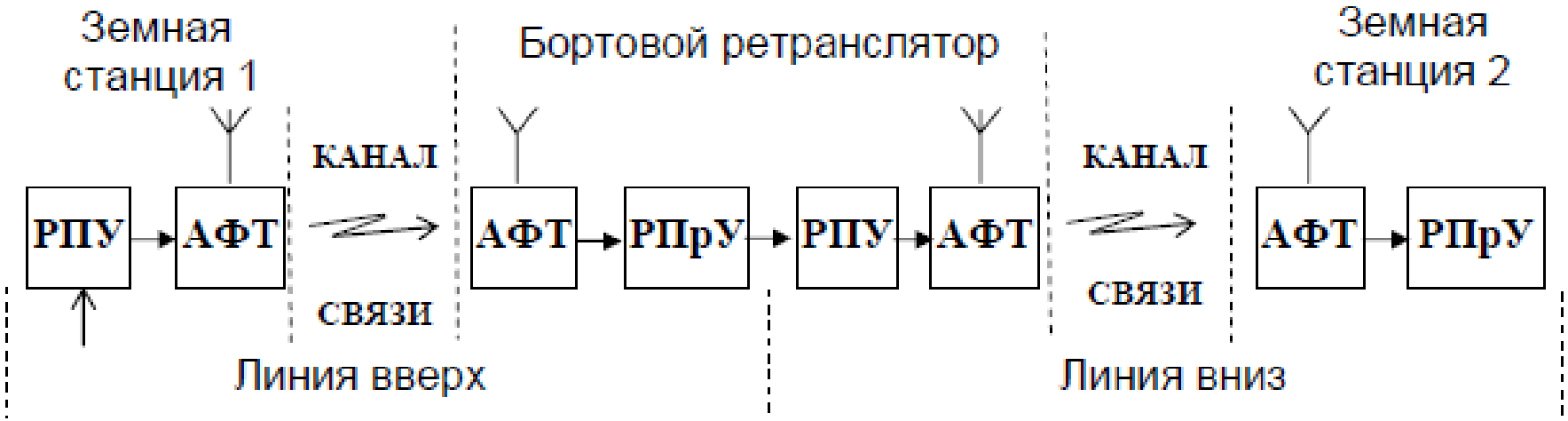
# Лекция 17

## Основные энергетические уравнения спутниковых радиолиний




Линия спутниковой связи состоит из двух участков – **Земля-КА** («линия вверх») и **КА-Земля** («линия вниз»). Каждый из участков содержит передающее и приемное устройство, антенные системы с соответствующими антенно-фидерными трактами (АФТ) и, наконец, канал связи, образованный участком пространства между земной станцией и космическим аппаратом. Энергетические параметры каждого из участков зависят от множества факторов (потери, связанные с распространением радиоволн в пространстве, потери в АФТ и трактах передачи и приема, потери, связанные с влиянием атмосферы, рефракции, вращением плоскости поляризации и т.п.)

**Основное уравнение радиолокации:**

$$P_{пр} = \frac{P_{пер}\eta_{пер}G_{пер}\eta_{пр}G_{пр}}{L_{св}}$$

Устанавливает связь между мощностями приема и передачи сигналов в свободном пространстве.

Чтобы **учесть дополнительные потери**, возникающие при передаче сигнала в реальных условиях $L_{св}=(4\pi d/\lambda)^2 \rightarrow L_{\Sigma}=L_{св}\cdot L_{доп}$:

$$P_{пр} = \frac{P_{пер}\eta_{пер}G_{пер}\eta_{пр}G_{пр}}{L_{\Sigma}} = \frac{P_{пер}\eta_{пер}G_{пер}\eta_{пр}G_{пр}\lambda^2}{16\pi^2R^2L_{доп}}$$

R – расстояние между точками приема и передачи (наклонная дальность)

Откуда можно выразить **мощность передатчика участка линии связи ССС**:

$$P_{пер} = \frac{16\pi^2R^2L_{доп}P_{пр}}{\eta_{пер}G_{пер}\eta_{пр}G_{пр}\lambda^2}$$

Если вместо мощности принимаемого сигнала задано отношение сигнал/шум на входе приемника $(P_c/P_ш)_{вх}$, то вместо $P_{пр}$ необходимо подставлять выражение $P_ш(P_c/P_ш)_{вх}$, где $P_ш$ – полная мощность шума на входе приемника.

$$P_ш = k\cdot\Delta f_ш\cdot T_{\Sigma}$$

k – постоянная Больцмана, $k=1{,}38\cdot10^{-23}$ Вт/(Гц·град);
$\Delta f_ш$ – эквивалентная шумовая полоса приемника, Гц;
$T_{\Sigma}$ – эквивалентная шумовая температура, приведенная ко входу станции, К.

# Мощность передатчика

**на участке Земля-КА:**

$$P_{пер.З} = \frac{16\pi^2 R_1^2 L_{1доп} P_{ш.Б}}{\eta_{пер.З} G_{пер.З} \eta_{пр.Б} G_{пр.Б} \lambda_1^2}$$

**на участке КА-Земля:**

$$P_{пер.Б} = \frac{16\pi^2 R_2^2 L_{2доп} P_{ш.З}}{\eta_{пер.Б} G_{пер.Б} \eta_{пр.З} G_{пр.З} \lambda_2^2}$$

Общее уравнение всей линии связи, состоящей из двух участков, будет зависеть от связи между суммарным отношением сигнал/шум на всей линии связи $(P_с/P_ш)_\Sigma$ и отношениями $(P_с/P_ш)_{вх.Б}$, $(P_с/P_ш)_{вх.З}$. Шумы всех участков линии складываются, следовательно, необходимо, чтобы отношение сигнал/шум на каждом участке линии связи было больше, чем на всей линии, т.е.

$$\left(P_с/P_ш\right)_{вх.Б} > \left(P_с/P_ш\right)_\Sigma \qquad \left(P_с/P_ш\right)_{вх.З} > \left(P_с/P_ш\right)_\Sigma \quad \longrightarrow \quad \left(P_с/P_ш\right)_{вх.Б} = a\left(P_с/P_ш\right)_\Sigma \qquad \left(P_с/P_ш\right)_{вх.З} = b\left(P_с/P_ш\right)_\Sigma$$

a, b – коэффициенты превышения (запаса) энергии на линиях Земля-КА и КА-Земля соответственно; a>1, b>1

При сложении шумов первой и второй линий:

$$\left(P_с/P_ш\right)_\Sigma^{-1} = \left(P_с/P_ш\right)_{вх.Б}^{-1} + \left(P_с/P_ш\right)_{вх.З}^{-1} \longrightarrow$$

**Связь между коэффициентами запаса земной и бортовой станций** $a = b/(b-1)$

# Основные энергетические уравнения линий связи

**на участке Земля-КА:**

$$P_{пер.З} = \frac{16\pi^2 R_1^2 L_{1доп} k T_{ΣБ} \Delta f_{шз}}{\lambda_1^2 G_{пер.З} G_{пр.Б} \eta_{пер.З} \eta_{пр.Б}} a \left( \frac{P_c}{P_ш} \right)_Σ$$

**на участке КА-Земля:**

$$P_{пер.Б} = \frac{16\pi^2 R_2^2 L_{2доп} k T_{ΣЗ} \Delta f_{шБ}}{\lambda_1^2 G_{пер.Б} G_{пр.З} \eta_{пер.Б} \eta_{пр.З}} b \left( \frac{P_c}{P_ш} \right)_Σ$$

В уравнения входят все основные параметры бортовой и наземной аппаратуры, которые при многостанционном приеме (в данном случае двухстанционном) различны. Коэффициенты запаса в общем случае выбирают произвольно, но с учетом их взаимосвязи. При этом должен быть разумный компромисс между мощностями земного и бортового передатчиков, основную нагрузку должен брать на себя земной комплекс.

На практике величина коэффициента **b = 1,1…1,3**, тогда коэффициент запаса земной станции **a = 11…4,3**.

Величины $\eta_{пер.Б}$, $\eta_{пер.З}$, $\eta_{пр.Б}$, $\eta_{пр.З}$ зависят от конструктивно-технологических характеристик АФТ и обычно лежат в таких пределах:

$\boldsymbol{\eta_{пер.Б} = 0{,}65…0{,}9}$

$\boldsymbol{\eta_{пер.З} = 0{,}5…0{,}65}$

$\boldsymbol{\eta_{пр.Б} = 0{,}65…0{,}8}$

$\boldsymbol{\eta_{пр.З} = 0{,}8…0{,}95}$

# Факторы, влияющие на энергетику ССС



**Полный множитель затухания**

$$F = F_{св} + \cancel{F_з} + F_{тр}$$

Множитель затухания в свободном пространстве

$$F_{св} = 20\lg\frac{4\pi d}{\lambda}$$

~~Множитель ослабления за счет влияния земной поверхности~~

$$\cancel{F_з = F_д + F_р + F_и}$$

Множитель ослабления за счет влияния тропосферы

$$F_{тр} = F_г + F_о + F_{сл}$$

$F_д$ – дифракционный множитель;
$F_р$ – рефракционный множитель;
$F_и$ – интерференционный множитель.

$F_г$ – множитель ослабления в газах;
$F_о$ – множитель ослабления в осадках;
$F_{сл}$ – множитель ослабления в слоях тропосферы.

# Особенности построения бортовых ретрансляторов ССС



**Основное требование ко всем комплексам**, входящим в состав бортовой аппаратуры и оборудования спутниковой связи: **высокая надежность**, обеспечивающая безотказную работу в условиях космического пространства в течение длительного времени.

**Выбор возможного варианта построения бортового оборудования** должен определяться:

1) минимальным весом;
2) минимальной потребляемой мощностью;
3) наименьшими размерами.

**Технология изготовления отдельных блоков и деталей**, входящих в состав бортового оборудования, а также методы их контроля должны **учитывать следующее**:

1) при запуске эти изделия будут подвергаться ударным и вибрационным воздействиям;

2) при работе в космосе оборудование будет подвергаться воздействию радиации.

**Одно из главных требований к БРТ -** уверенный прием сигналов на фоне шумов**.**

**Суммарная мощность шумов, приведенная ко входу приемника БРТ:**

$$P_ш = P_{шпр} + P_{шф} + \eta P_{шА}$$

$P_{шпр}$ – мощность собственных шумов приемника;
$P_{шф}$ – мощность шумов, создаваемых фидерными трактами и другими узлами;
$P_{шА}$ – мощность шумов антенны с учетом тепловых шумов атмосферы, Земли и космических объектов;
$\eta$ – КПД фидера, фильтров, циркуляторов и других устройств, находящихся между антенной и входом приемника.

Суммарную мощность шума на входе приемника БРТ, как правило, выражают через эквивалентную шумовую температуру системы $T_{ш\Sigma}$, приведенную ко входу приемника и измеряемую в градусах Кельвина:

$$P_ш = k \cdot T_{ш\Sigma} \cdot \Delta f$$

k – постоянная Больцмана;
$\Delta f$ – полоса пропускания приемника.

$$T_{ш\Sigma} = T_{шпр} + \eta T_{шА}$$

$T_{шпр}$ – эквивалентная шумовая температура приемника;
$T_{шА}$ – эквивалентная шумовая температура антенны.

**Эквивалентная шумовая температура приемника:**

$$T_{шпр} = T_0\left(K_{ш\ пр} - 1\right)$$

$K_{ш\ пр}$ – коэффициент шума приемника; $K_{ш\ пр}$ = 0…20.
$T_0$ – реальная температура приемника, $T_0$ = 290 К.

**Эквивалентная шумовая температура антенны:**

$$T_{шА} = T_{шкос} + T_{шатм} + T_{шАе} + T_{шЗ}$$

$\mathbf{T_{шЗ}}$ – эквивалентная шумовая температура Земли, как правило, $T_{шЗ}$ = 290 К, при ориентации антенн БРТ на Землю ее шумы будут превалирующими; за счет наличия у антенн боковых лепестков $T_{шЗ}$ может увеличиваться на 10…30 К.

$\mathbf{T_{шатм}}$ **–** учитывает влияние атмосферных явлений, в наибольшей степени это влияние проявляется на частотах свыше 22 ГГц из-за резонансного поглощения энергии сигнала в водяных парах.

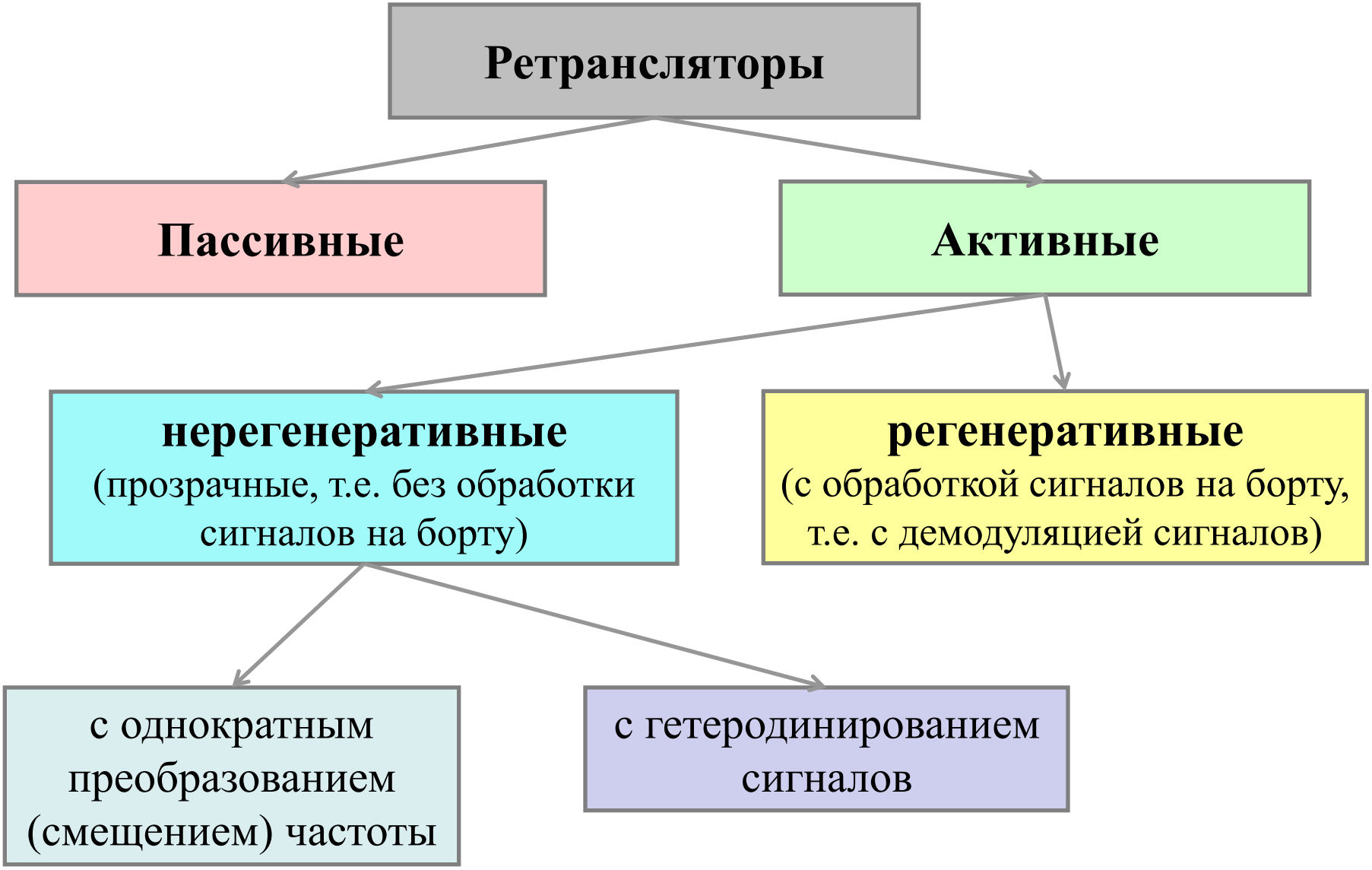
$\mathbf{T_{шкос}}$ – эквивалентная температура космических шумов. К таким шумам относятся, например, излучения Солнца и Луны; если антенна окажется точно ориентированной на Солнце или Луну (что весьма маловероятно), то $T_{шкос}$ будет равна 25000 К или 210 К соответственно.

$\mathbf{T_{шАе}}$ – эквивалентная температура омических (собственного радиоизлучения) шумов антенны; обычно невелика и составляет не более 0,2 К, однако за счет наличия обтекателя может возрастать до 5…10 К.

Суммарная шумовая температура может существенно превышать 290 К и в некоторых случаях достигать значений свыше 1000 К.

# Классификация бортовых ретрансляторов ССС





# Пассивные ретрансляторы



**Пассивный ретранслятор** — устройство, определённой формы механическая конструкция, электропроводящая среда или небесное тело определенной формы, способное рассеивать или направленно отражать электромагнитное излучение рабочего диапазона частот линии связи и используемое в качестве промежуточного пункта этой линии.

На ранних этапах развития спутниковой связи использовались пассивные ретрансляторы в виде металлических сфер различного размера и формы.

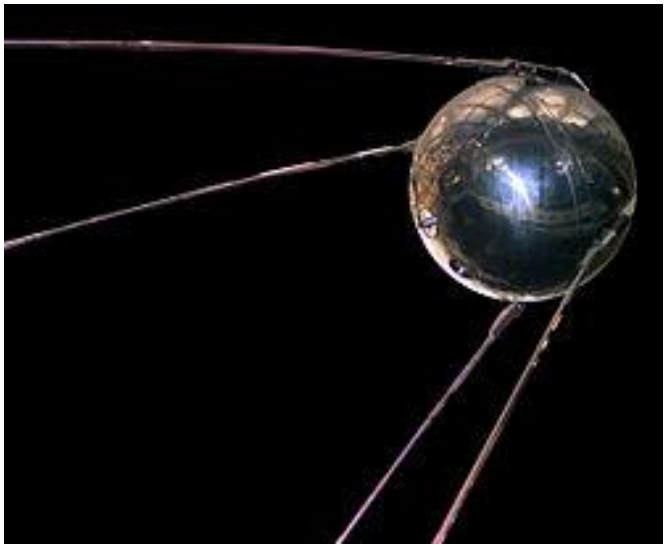
Первым пассивным спутниковым ретранслятором стал аппарат «Эхо-1», представлявший собою полую металлическую сферу диаметром 30 м.

Эхо-1

Эхо-2

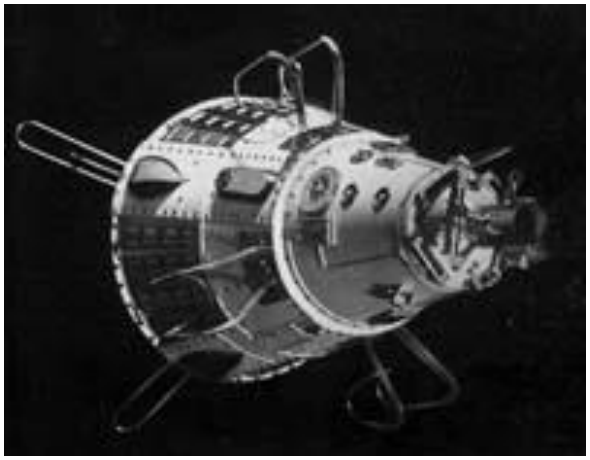
Сфера d=40 м, покрытая алюминием

**Первый в мире искусственный спутник Земли ПС-1 (Спутник-1)**, запущенный в СССР 4 октября 1957 года, масса около 100 кг



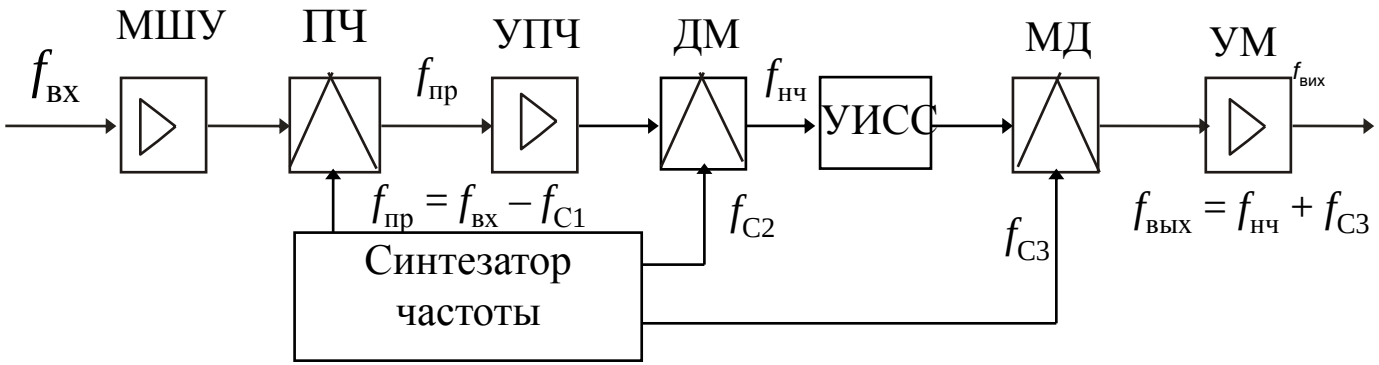
**Второй искусственный спутник Земли (Спутник-2)** – первый в мире биологический спутник, в герметической кабине которого в ноябре 1957 г. совершила полет собака Лайка.

**Третий искусственный спутник Земли** – первая в мире автоматическая научная лаборатория в космосе. Запущен в мае 1958 г. для проведения исследований околоземного и космического пространства. Масса спутника около 1,5 т.



# БРТ с демодуляцией сигналов






Сигнал, принятый на частоте $f_{вх}$, преобразуется в сигнал промежуточной частоты $f_{пр} = f_{вх} - f_{сдв}$, усиливается в тракте ПЧ и демодулируется. Демодулированный НЧ сигнал обрабатывается в устройстве изменения структури сигнала (УИСС) и поступает в модулятор (МД). ВЧ выходной сигнал модулятора через усилитель мощности (УМ) направляется в антенну.

**Цель описанного алгоритма** – повышение эффективности передачи сигналов.

**Демодуляция радиосигналов на борту целесообразна, если**:

– необходимо выделить и переформатировать на борту многоканальные сообщения перед их отправкой земным станциям;

– используются различные способы либо глубины модуляции в линиях Земля-Ка и КА-Земля;

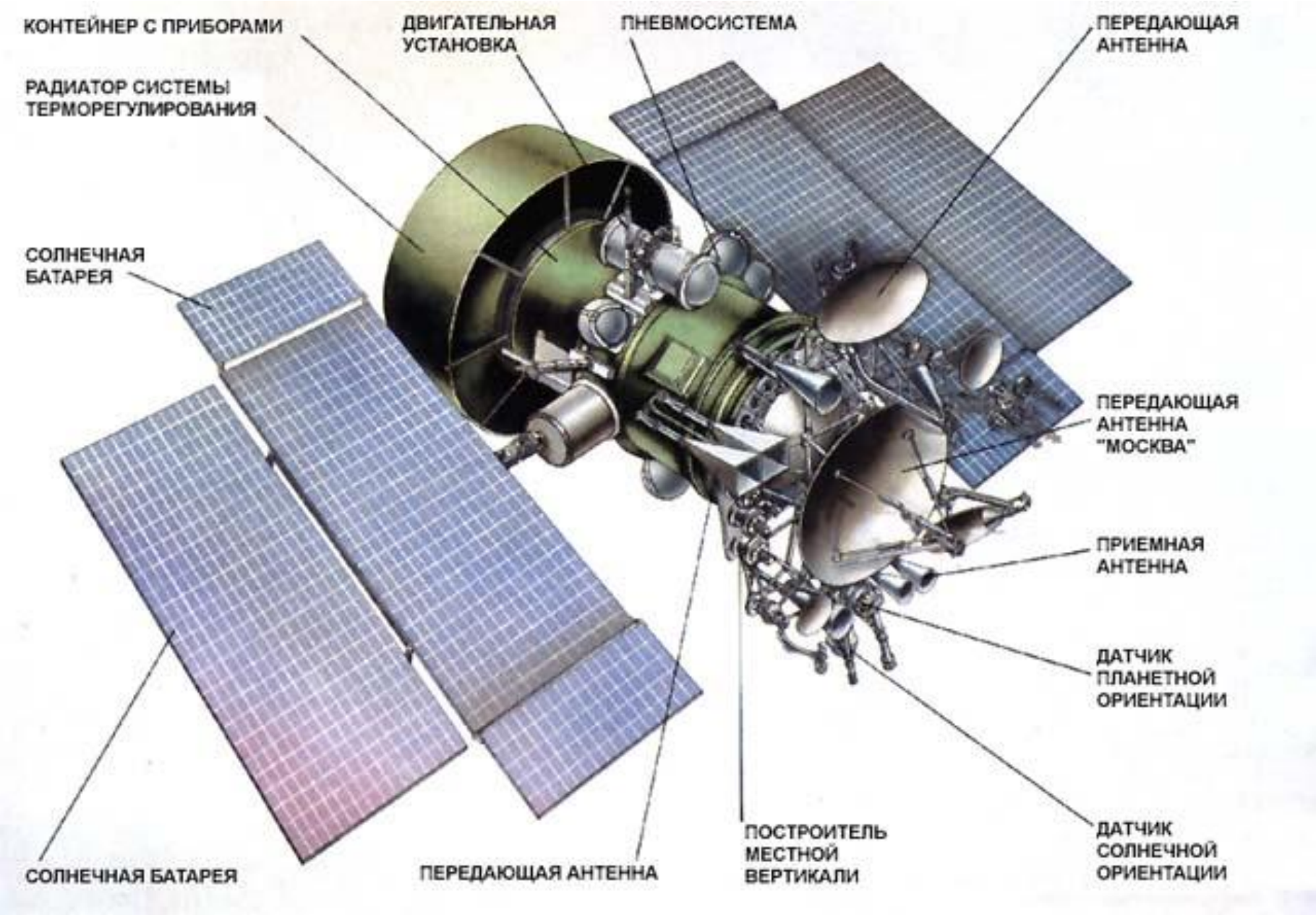
- в БРТ производится регенерация цифровых сигналов, передаваемых от земных станций.

БРТ с демодуляцией сигнала на борту широко использовались на начальных этапах развития спутниковой связи (спутники «Молния», «Экран», «Горизонт»), поскольку на тот момент усилители с коэффициентом усиления 50…60 дБ в бортовом исполнении можно было реализовать только на промежуточной частоте.

ВЭО-спутник «Молния-1», работавший в диапазоне 800…1000 МГц и обеспечивавший ретрансляцию ТВ программ и передачу сигналов дуплексной многоканальной телефонной связи

# Геостационарный спутник связи «Горизонт»

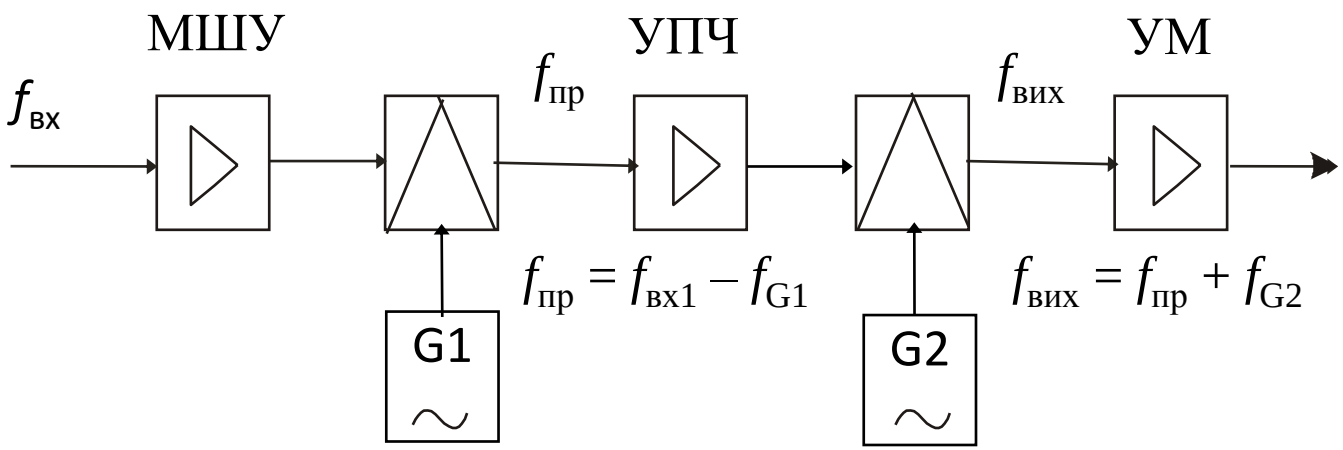




# Спутник связи «Экран»

# БРТ гетеродинного типа



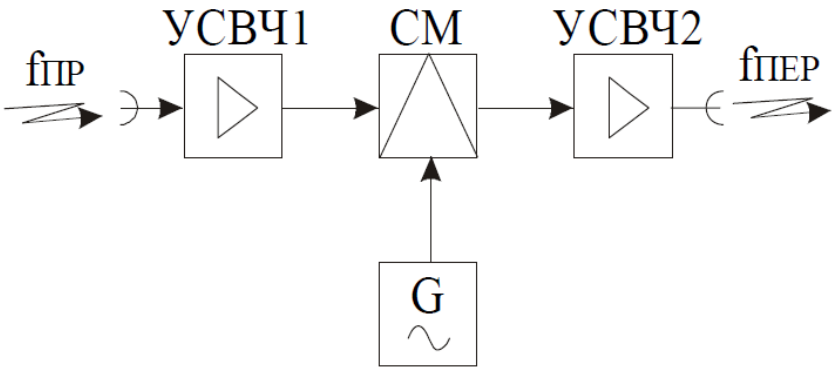



МШУ – малошумящий усилитель;
УПЧ – усилитель промежуточной частоты;
УМ – усилитель мощности, производящий усиление сигнала на частоте передачи.

Такие БРТ имеют полосу порядка 40 МГц, а основное усиление обеспечивается в тракте промежуточной частоты в пределах 70…120 МГц. Чаще всего в гетеродинных БРТ производится 2 преобразования частоты: в стволе приема линии Земля-КА (с понижением частоты) и в стволе передачи линии КА-Земля (с повышением частоты). Разность между промежуточными частотами, генерируемыми гетеродинами G1 и G2 определяет частотный сдвиг между частотами приема и передачи.

# БРТ с однократным преобразованием частоты





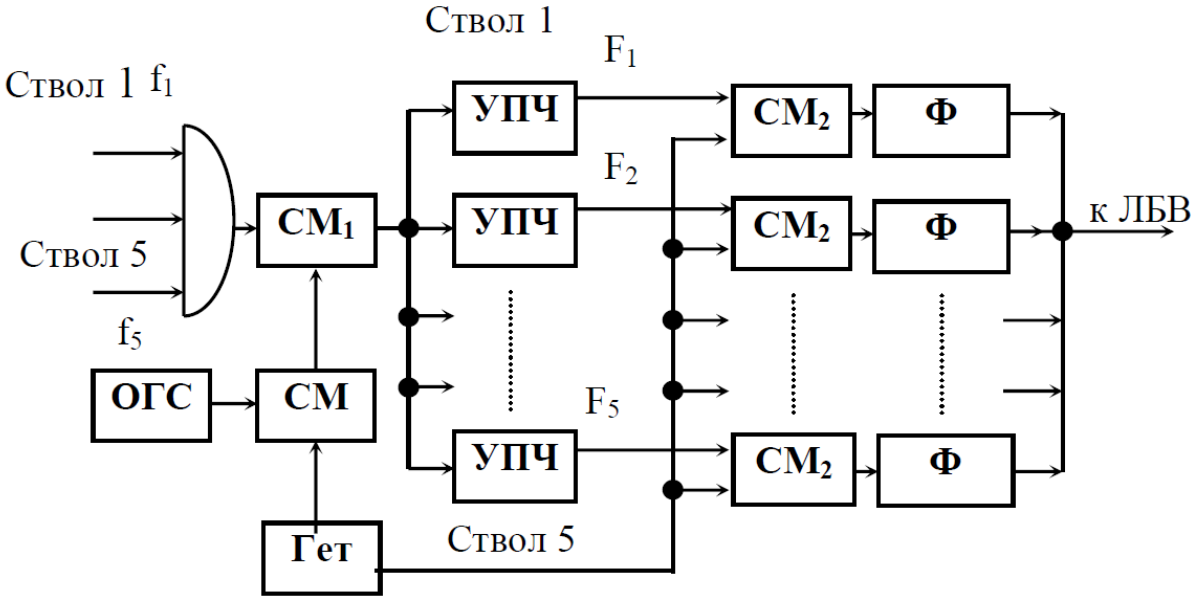

В таких БРТ принимаемый радиосигнал ствола сразу преобразуется в передаваемый сигнал частотой $f_{пер} = f_{пр} – F_{сдв}$ , где $F_{сдв}$ - частота сдвига. Величина сдвига $F_{сдв}$ может быть различной в зависимости от используемых данной ССС полос частот.

Так, например, в БРТ спутниковых систем "Интелсат-5", "Интелсат-6" частота приема составляет 6 ГГц, частота передачи – 4 ГГц, а частота сдвига соответственно – 2 ГГц. В некоторых ССС частота сдвига может быть порядка 750 МГц.

Спутник «Intelsat-5»

# Многоствольные БРТ






В целях сокращения бортовой аппаратуры в многоствольных БРТ организуют общие блоки усиления для нескольких стволов. Основное усиление в каждом стволе осуществляется сравнительно узкополосным УПЧ на разных промежуточных частотах, а затем, после ограничения и смещения в область СВЧ, все стволы объединяются для последующего усиления с помощью ЛБВ. В УПЧ каждого ствола имеется ограничитель амплитуды и система АРУ.

Одновременное прохождение сигналов нескольких стволов через общий усилитель, характеристики которого всегда имеют некоторую нелинейность, будет приводить к появлению переходных шумов. Увеличение уровня шумов требует увеличения мощности бортового и земного передатчика или повышения коэффициента усиления передающих антенн.