

МЕТОДИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛИНИЙ

к.т.н. В.Н. Харченко, А.А. Лаврут, В.П. Кукушкин
(представил д.т.н., проф. М.А. Иванов)

Предлагается методика расчета, позволяющая проектировать сети спутниковой связи, задавать требования к характеристикам земных станций и обоснованно выбирать тип используемого бортового ретранслятора.

Одним из этапов проектирования систем спутниковой связи (ССС) является энергетический расчет радиолинии, на основе которого задаются требования к характеристикам земных станций и бортовых ретрансляторов. Энергетический расчет служит также для оценок электромагнитной совместимости (ЭМС) наземных и космических радиослужб, помехозащищенности спутниковых радиолиний и пропускной способности сетей спутниковой связи. Исходными данными для проектирования системы спутниковой связи являются: топология сети спутниковой связи (полнодоступная сеть, “звезда”, “вложенные звезды” и т.д.) и географическое расположение оконечных станций, количество элементов сети (земных станций), требуемая скорость и достоверность передачи информации, время установления соединения, требуемая надежность связи. Проектирование сети выполняется в рамках определенных ограничений. Такими ограничениями могут быть: тип бортового ретранслятора космического аппарата связи, координаты подспутниковой точки (точки стояния), координаты точки прицеливания бортовой антенны, диапазон рабочих частот (**L**-, **C**-, **Ku**- диапазоны).

Целью проектирования является оптимальный выбор параметров элементов сети спутниковой связи в рамках заданных ограничений.

Основными параметрами земных станций (ЗС) являются: мощность передатчика, диаметр антенны, потери в фидере, частота на передаче/прием, географические координаты.

Основными параметрами бортового ретранслятора (БР) являются: долгота подспутниковой точки, долгота и широта точки наведения, мощность передатчика, температура шума, форма диаграммы направленности бортовой антенны, полоса частот ствола, уровень ближайшего бокового лепестка, режим работы ретранслятора (жесткий или мягкий). При отсутствии каких-либо ограничений на элементы системы (ЗС, БР) необходимо провести совместную оптимизацию как параметров земной станции, так и параметров бортового ретранслятора, которые обеспечи-

вали бы требуемые характеристики сети спутниковой связи при минимальных затратах при ее развертывании и эксплуатации. Проведение подобной оптимизации предполагает выполнение энергетического расчета для каждой конкретной радиолинии сети спутниковой связи и нахождение приемлемого варианта построения сети с выбранным типом БР и различными типами ЗС. При этом необходимо контролировать выполнение условий электромагнитной совместимости. Сложность поставленной задачи требует автоматизации выполнения расчетов. Предлагается методика расчета основных характеристик спутниковых радиолиний, основанная на использовании рекомендаций Международного Консультативного Комитета по Радиосвязи (МККР) и адаптированная для решения задач на ПЭВМ. В соответствии с данной методикой расчеты производятся в следующей последовательности.

1. Рассчитывается мощность сигнала на входе приемника бортового ретранслятора $P_{ВХ.Б}$. При этом учитываются географические координаты передающей станции спутниковой связи, параметры орбиты спутника-ретранслятора, углы взаимной ориентации главных лепестков диаграмм направленности наземной и бортовой антенн, а также дополнительные потери, возникающие при распространении сигнала в атмосфере.

Вычисление мощности сигнала на входе бортового ретранслятора производится по известному соотношению

$$P_{ВХ.Б} = P_{ПД.ЗС} + G_{ПД.ЗС}(\Delta\gamma) - b_{ПД.ЗС} - 20 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda_p} \right) + \quad (1)$$

$$+ G_{ПР.Б}(\Delta\Omega) - b_{ПР.Б} - A_{a0} - A_d(T),$$

где $P_{ПД.ЗС}$ - мощность передатчика ЗС, дБВт; $G_{ПД.ЗС}(\Delta\gamma)$ - коэффициент направленного действия передающей антенны земной станции, дБВт, в направлении на спутник - ретранслятор, зависящий от диаметра зеркала $D_{А.ЗС}$ антенны ЗС, коэффициента использования площади раскрыва антенны ν , относительной точности изготовления антенны k и рабочей длины волны; $\Delta\gamma$ - угол между направлением максимального излучения антенны ЗС и направлением на спутник, характеризующий ошибку наведения антенны; $b_{ПД.ЗС}$ - потери в передающем фидере ЗС, дБ; d - расстояние между земной станцией и спутником, м; λ_p - рабочая длина волны, м; $G_{ПР.Б}(\Delta\Omega)$ - коэффициент направленного действия приемной антенны бортового ретранслятора в заданном направлении, дБ, зависящий от величины осей эллипса сечения диаграммы направленности $\alpha^\circ \times \beta^\circ$ на уровне 3 дБ и формы диаграммы направленности (ДН) антенны; $\Delta\Omega$ - угол между направлением ориентации приемной антенны спутника и направлением на

земную станцию, зависящий от географических широты ϕ и долготы ψ земной станции спутниковой связи, параметров орбиты (высоты H и координат подспутниковой точки ϕ_{Π} и ψ_{Π}), а также координат точки прицеливания бортовой антенны спутника - ретранслятора ϕ_{Π} и ψ_{Π} ; $b_{\text{пр.б}}$ – потери в приемном фидере бортового ретранслятора, дБ; $A_{\text{ао}}$ - потери в атмосфере, дБ, (в кислороде и водяном паре); $A_{\text{д}}(T)$ - потери в дожде, дБ, превышаемые в течении $T\%$ времени.

Дополнительные потери в основном определяются поглощением в атмосфере и поляризационными потерями. Они зависят от угла места θ и климатического района, в котором расположена земная станция, а также от рабочей частоты передачи и приема.

2. Рассчитывается отношение сигнал/шум на входе бортового приемника спутника-ретранслятора $g_{\text{ВХ.Б}}$. Для этого необходимо воспользоваться формулой

$$g_{\text{ВХ.Б}} = P_{\text{ВХ.Б}} - 10 \lg(k T_{\text{ШБ}} \Delta F_{\text{С.ЭФФ}}) \quad (2)$$

или

$$g_{\text{ВХ.Б}} = P_{\text{ВХ.Б}} - 10 \lg T_{\text{ШБ}} - 10 \lg \Delta F_{\text{С.ЭФФ}} - 228,6 \quad ,$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ дж/град – постоянная Больцмана; $T_{\text{ШБ}}$ – шумовая температура, K° , приведенная ко входу бортового приемника; $\Delta F_{\text{С.ЭФФ}}$ – полоса частот согласованная с шириной спектра излученного сигнала.

3. Рассчитывается мощность сигнала на входе приемника земной станции спутниковой связи $P_{\text{ВХ.ЗС}}$. Расчет мощности сигнала выполняется согласно выражению

$$P_{\text{ВХ.ЗС}} = P_{\text{ПД.Б}}^* + G_{\text{ПД.Б}}(\Delta\Omega) - b_{\text{ПД.Б}} + G_{\text{ПР.ЗС}}(\Delta\gamma) - b_{\text{ПР.ЗС}} - 20 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda_{\text{Р}}} \right) - A_{\text{ао}} - A_{\text{д}}(T), \quad (3)$$

где $P_{\text{ПД.Б}}^*$ - эффективно используемая для передачи полезных сигналов мощность бортового передатчика, дБВт, вычисляемая в соответствии с выражением

$$P_{\text{ПД.Б}}^* = 10 \lg [P_{\text{ПД.Б}} \eta_{\text{ПД.Б}} (1 - \alpha_{\text{НЕЛ}})] ; \quad (4)$$

$P_{\text{ПД.Б}}$ - мощность передатчика бортового ретранслятора, Вт, определяемая режимом его работы (насыщение, снижение мощности на X дБ);

$G_{\text{ПД.Б}}(\Delta\Omega)$ - коэффициент направленного действия передающей антенны бортового ретранслятора в направлении на приемную ЗС, дБ,

зависящий от величины осей эллипса сечения диаграммы направленности $\alpha^\circ \times \beta^\circ$ на уровне -3 дБ и формы ДН антенны;

$\Delta\Omega$ - угол между направлением ориентации передающей антенны спутника и направлением на земную станцию, зависящий от географических широты φ и долготы ψ земной станции спутниковой связи, параметров орбиты (высоты H и координат подспутниковой точки φ_{Π} и ψ_{Π}) а также от координат точки прицеливания бортовой антенны спутника-ретранслятора φ_{Π} и ψ_{Π} ;

$b_{\text{ПД.Б}}$ - потери в передающем фидере бортового ретранслятора, дБ;

$G_{\text{ПР.ЗС}}(\Delta\gamma)$ - коэффициент направленного действия приемной антенны земной станции в направлении на спутник-ретранслятор, дБ, зависящий от диаметра зеркала $D_{\text{А.ЗС}}$ антенны ЗС, коэффициента использования площади раскрыва антенны v , относительной точности изготовления антенны k и рабочей длины волны;

$\Delta\gamma$ - угол между направлением максимума ДН антенны ЗС и направлением на спутник, характеризующий ошибку наведения антенны;

$b_{\text{ПР.ЗС}}$ - потери в приемном фидере ЗС, дБ;

d - расстояние между земной станцией и спутником;

λ_p - рабочая длина волны;

$A_{\text{ао}}$ - потери в атмосфере (в кислороде и водяном паре), дБ;

$A_{\text{д}}(T)$ - потери в дожде, дБ, превышаемые в течение $T\%$ времени;

$\eta_{\text{ПД.Б}}$ - коэффициент полезного действия (кпд) передатчика бортового ретранслятора;

$\alpha_{\text{НЕЛ}}$ - доля продуктов нелинейных искажений, определяемая режимом работы ретранслятора и расстановкой частот в полосе ствола.

4. Оценивается мощность шума в полосе согласованной с шириной спектра излученного сигнала $P_{\Sigma\text{Ш.ЗС}}$ и рассчитывается отношение сигнал/шум $g_{\text{ВХ.ЗС}}$ на входе демодулятора приемника земной станции спутниковой связи с заданными географическими координатами, т.е. на трассе «борт-Земля».

Для расчета отношения сигнал/шум на входе приемника ЗС необходимо воспользоваться формулой

$$g_{\text{ВХ.ЗС}} = P_{\text{ВХ.ЗС}} - P_{\Sigma\text{Ш.ЗС}} \quad (5)$$

или

$$g_{\text{ВХ.ЗС}} = P_{\text{ПД.Б}} + G_{\text{ПД.Б}}(\Delta\Omega) - b_{\text{ПД.Б}} + \eta_{\text{ПД.Б}} + 10\lg(1 - \alpha_{\text{НЕЛ}}) - 10\lg N + G_{\text{ПР.ЗС}}(\Delta\gamma) - b_{\text{ПР.ЗС}} - 20\lg\left(\frac{4\pi d}{\lambda_p}\right) - A_{\text{ао}} - A_{\text{д}}(T) - P_{\Sigma\text{Ш.ЗС}}, \quad (6)$$

где $\eta_{ПД,Б}$ – КПД передатчика бортового ретранслятора;

$\alpha_{НЕЛ}$ – доля продуктов нелинейных искажений, определяемая режимом работы ретранслятора и расстановкой частот в полосе ствола [3];

N – количество станций в системе спутниковой связи.

Остальные переменные, входящие в выражение (6), определены ранее.

Суммарная мощность шумов, приведенная ко входу приемника ЗС определяется формулой

$$P_{\Sigma ЗС} = 10 \lg(P_{Ш,ЗС} + P_{Ш,ПЕРЕИЗЛ} + P_{Ш,НЕЛ}) , \quad (7)$$

где $P_{Ш,ЗС}$ – мощность шумов, Вт, приведенная ко входу приемника ЗС [2];

$P_{Ш,ПЕРЕИЗЛ}$ – мощность шумов, Вт, переизлученных бортовым ретранслятором и попадающих в полосу основной селекции приемника ЗС;

$P_{Ш,НЕЛ}$ – мощность шумов, возникающих за счет продуктов нелинейных преобразований при многосигнальном воздействии на бортовой ретранслятор, приведенная ко входу приемника ЗС.

5. Находится суммарное отношение сигнал/шум на трассе «Земля-борт-Земля» $g_{\Sigma ЗС}$, приведенное ко входу демодулятора приемника земной станции спутниковой связи. Для этого используются результаты, полученные в п.2 и 4, и соотношение

$$g_{\Sigma ЗС} = \left[\frac{1}{g_{ВХ,Б}} + \frac{1}{g_{ВХ,ЗС}} \right]^{-1} , \quad (8)$$

где $g_{ВХ,Б} = 10^{0,1 g_{ВХ,Б,дБ}}$; $g_{ВХ,ЗС} = 10^{0,1 g_{ВХ,ЗС,дБ}}$, а $g_{ВХ,Б,дБ}$ и $g_{ВХ,ЗС,дБ}$ вычисляются в соответствии с выражениями (2) и (6).

6. При использовании N независимых сигналов, проходящих через нелинейный ретранслятор, во-первых, мощность бортового передатчика перераспределяется между входными сигналами (при равных мощностях входных сигналов распределяется поровну); во-вторых, часть мощности бортового передатчика расходуется на переизлучение шумов, а также продуктов нелинейных искажений и, в-третьих, продукты нелинейных искажений создают дополнительные помехи в каждом из N каналов. Если доля продуктов нелинейных искажений $\alpha_{НЕЛ}$, зависящая от режима работы ретранслятора и расстановки частот в полосе ствола, определена, то мощность бортового ретранслятора, используемая для передачи полезных сигналов, Вт, равна

$$P^*_{\text{ПД.Б}} = P_{\text{ПД.Б}} \eta_{\text{ПД.Б}} (1 - \alpha_{\text{НЕЛ}}).$$

Для расчетов более удобной является логарифмическая мера. С учетом этого, мощность бортового ретранслятора, используемая для передачи полезных сигналов, дБВт, равна

$$P^*_{\text{ПД.Б}} = P_{\text{ПД.Б}} + \eta_{\text{ПД.Б}} + 10 \lg(1 - \alpha_{\text{НЕЛ}}).$$

В соответствии с данной методикой разработана программа, написанная на языке Delphi 3. Программа позволяет исследовать влияние параметров отдельных устройств, входящих в состав ЗС и БР, на системные характеристики и характеристики сетей спутниковой связи, производить оценку ЭМС и помехозащищенности космических радиолиний. Тем самым, варьируя параметрами системы добиваться максимума значения целевой функции.

Представленная методика энергетического расчета спутниковых радиолиний, адаптированная для решения задач на ПЭВМ, позволяет получить точность, вполне достаточную для решения прикладных инженерных задач. Это дает возможность обоснованно выбирать тип бортового ретранслятора и оптимизировать параметры земных станций, обеспечивающие информационный обмен в сетях спутниковой связи при заданных скоростях передачи информации и качестве связи. Данная методика может быть использована для оценки помехозащищенности спутниковых радиолиний и ЭМС наземных и космических радиослужб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородич С.В. ЭМС наземных и космических радиослужб. Критерии, условия и расчет. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.
2. Рекомендации и отчеты МККР. Том IV - часть I. Фиксированная спутниковая служба. – Дубровник, 1986. – 560 с.
3. Харченко В. Н., Лаврут А. А. Методика системного проектирования сетей спутниковой связи // Наук. - техн. конференция, тез. доп. – Харків: МОУ, ВППО, ХВУ. – 1999. – Вип. 3. – С. 23.
4. Харченко В. Н., Лаврут А. А. Особенности оценки помехозащищенности спутниковых радиолиний // Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. – № 4. – С. 96.

Поступила в редколлегию 2.08.2000