

*М. Ж. ЖУАТ, А. А. САДЫКОВ, Н. Н. ТАШАТОВ*

## **ВЫЧИСЛЕНИЕ ОБЩЕЙ ВЕРОЯТНОСТИ БИТОВОЙ ОШИБКИ В СПУТНИКОВЫХ РЕТРАНСЛЯТОРАХ**

*(Представлена академиком НАН РКМ. О. Отелбаевым)*

Рассмотрены нерегенеративные спутниковые ретрансляторы и вычисляется общая вероятность битовой ошибки в спутниковой связи.

Системы спутниковой связи и вещания применяются для решения самых разнообразных задач по передаче информации в течение последних десятилетий, и интерес к обеспечению связи через спутник продолжает расти, особенно в последнее время при всевозрастающих потребностях в глобальных скоростных телекоммуникациях.

Несмотря на то, что наземные средства позволяют удовлетворить определенную часть этих

потребностей, спутниковые системы, обладающие рядом особенностей, выгодно выделяющих их среди других родов и систем связи, активно конкурируют с наземными системами и гармонично дополняют их.

Как известно, спутниковая связь имеет определенные преимущества над наземными системами связи. Вследствие использования беспроводных технологий, спутниковые сети могут достичь удаленных географических областей,

что является актуальным для Казахстана, учитывая специфику страны: большую территорию с низкой и неравномерной плотностью населения, увеличивающееся количество населения, а также недостаточно развитую телекоммуникационную инфраструктуру. Благодаря своей независимости от услуг телекоммуникационных компаний, спутниковая связь не подвержена перерывам в работе.

Особенность спутниковой связи заключается в том, что спутниковые ретрансляторы повторно передают все получаемые сообщения (с трансляцией на несущей частоте). *Регенеративные* (цифровые) ретрансляторы перед повторной передачей регенерируют, т.е. демодулируют и восстанавливают цифровую информацию, заложенную в принятый сигнал\*. *Нерегенеративные* ретрансляторы только усиливают и повторно передают сообщение. Следовательно, нерегенеративный ретранслятор может использоваться с различными форматами модуляции (одновременно или последовательно без какой-либо коммутации), а регенеративный обычно проектируется для работы только с одним форматом модуляции (или очень малым количеством). В процессе анализа канала связи для регенеративного спутникового ретранслятора каналы «земля-спутник» и «спутник-земля» рассматриваются раздельно. Для вычисления общей вероятности битовой ошибки в канале регенеративного ретранслятора необходимо отдельно определить вероятности появления ошибочного бита в каждом из двух каналов.

Пусть  $P_u$  и  $P_d$  – вероятности появления ошибочного бита в каналах «земля-спутник» (*uplink*) и «спутник-земля» (*downlink*). Бит будет безошибочно передан между двумя оконечными наземными устройствами, если в обоих последовательных каналах бит будет передан либо точно, либо с ошибкой. Следовательно, общая вероятность точной передачи бита, равна

$$P_c = (1 - P_u)(1 - P_d) + P_u P_d. \quad (1)$$

Общая вероятность появления ошибочного бита равна

$$P_B = (1 - P_c) = P_u + P_d - 2 P_u P_d. \quad (2)$$

При малых значениях  $P_u$  и  $P_d$  общая вероятность ошибки получается при простом сумми-

ровании вероятностей появления ошибки в отдельных каналах:

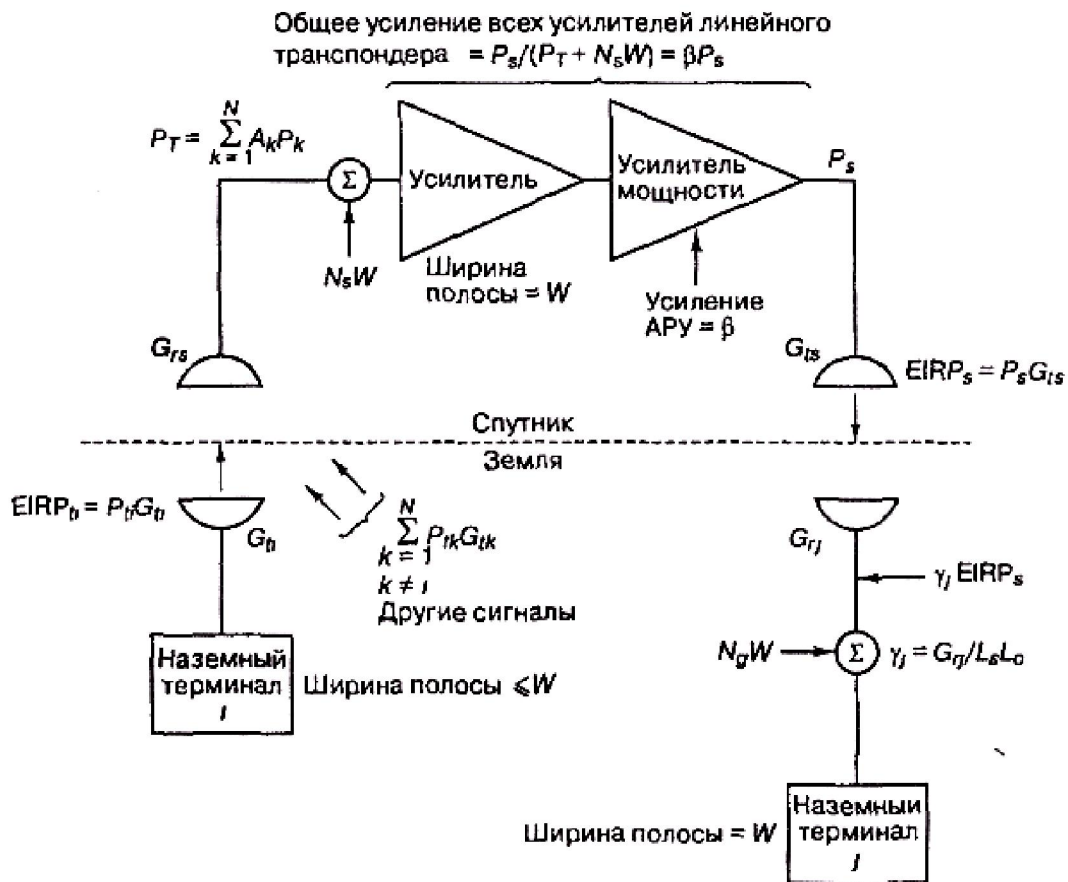
$$P_B \approx P_u + P_d. \quad (3)$$

Анализ канала спутниковой связи «KazSat» показывает, что для нерегенеративного ретранслятора – это анализ полного «оборота» сигнала (передача на спутник и ретрансляция на наземное оконечное устройство). Нерегенеративный ретранслятор имеет несколько уникальных особенностей – это зависимость общего отношения **SNR** от **SNR** канала «земля-спутник» и совместное использование мощности канала «спутник-земля» каждым сигналом и шумом канала «земля-спутник». С этого момента при обращении к ретранслятору или транспондеру будем подразумевать *нерегенеративный ретранслятор*, и для простоты будем предполагать, что транспондер работает в собственном линейном диапазоне.

Возможности спутникового транспондера ограничены мощностью канала «спутник-земля», мощностью наземного оконечного устройства, которая подается в канал «земля-спутник», шумом спутника и наземной оконечной станции, а также шириной полосы канала. Как правило, основные ограничения накладывает один из этих параметров, довольно часто – это мощность канала «спутник-земля» или ширина полосы канала. Важнейшие параметры линейного спутникового канала связи показаны на рисунке.

Ретранслятор передает все сигналы канала «земля-спутник» (или шум, при отсутствии сигнала) без какой-либо обработки, за исключением усиления и трансляции по частоте. Предположим, что в пределах полосы приемника  $W$  существуют множество каналов «земля-спутник» используемые одновременно и их разделение производится с помощью метода, известного как *множественный доступ с частотным разделением* (frequency-division multiple access – FDMA). Технология FDMA – это метод совместного использования ресурсов связи посредством распределения между пользователями отдельных участков полосы транспондера. Эффективная мощность канала «спутник-земля»  $EIRP_s$  является константой, и поскольку мы предполагаем использование линейного транспондера,  $EIRP_s$  разделена между множеством сигналов и шумов канала

\* Садыков А.А. Технология спутниковой связи на железнодорожном транспорте // Магистраль. 2002. № 6. С. 9-15.



Регенеративный спутниковый ретранслятор

«земля-спутник» пропорционально соответствующим уровням входного напряжения.

Передача начинается с наземной станции (ширина полосы  $\leq W$ ), скажем терминала  $i$ , причем EIRP терминала  $EIRP_{Ti} = P_{Ti} G_{Ti}$ . Одновременно на спутник передаются другие сигналы с других терминалов. Мощность EIRP с  $k$ -го терминала обозначим через  $P_k$ . На спутнике мощность общего принятого сигнала равна  $P_T = \sum A_k P_k$ , где  $A_k$  описывает потери распространения в канале «земля-спутник» и КНД спутниковой антенны для  $k$  канала.  $N_s W$  — это мощность шума в канале «земля-спутник», а  $N_s$  — общая спектральная плотность мощности шума, возникающего в спутниковом приемнике и излучающей спутниковой антенне. Общую мощность EIRP канала «спутник-земля» равна  $EIRP_s = P_s G_{Ts}$ , где  $P_s$  — мощность на выходе спутникового транспондера, а  $G_{Ts}$  — КНД передающей антенны спутника, можно выразить следующим образом:

$$EIRP_s = EIRP_s \beta [A_i P_i + (P_T - A_i P_i) + N_s W]. \quad (4)$$

Обе части формулы (4) выражают общую мощность EIRP спутника. Выражение  $\beta [A_i P_i + (P_T - A_i P_i) + N_s W]$  в правой части является раздробленным пропорциональным распределением EIRP, между различными пользователями и шумом канала, так что суммарное значение этого выражения равно 1. Полезность приведенного равенства вскоре станет очевидной. Общее усиление мощности в транспондере можно выразить как  $\beta P_s$ . Поскольку  $P_s$  фиксированы, а входные сигналы могут быть различными,  $\beta = 1 / (P_T + N_s W)$  — это значение коэффициента автоматической регулировки усиления. Общую мощность сигнала, принятого из канала «земля-спутник»,  $P_T$  можно записать как  $A_i P_i + (P_T - A_i P_i)$ , разделив мощность  $j$ -го сигнала и мощность остальных сигналов в транспондере. Общую мощность, принятую  $j$ -м наземным терминалом с шириной полосы  $W$  можно записать следующим образом:

$$P_{rj} = \text{EIRP}_s \gamma_j \beta [A_i P_i + (P_T - A_i P_i) + N_s W] + N_g W, \quad (5)$$

где  $\gamma_j = G_{rj} / L_s L_0$  учитывает потери в канале «спутник-земля» и КНД принимающей антенны для  $j$ -го наземного терминала.  $\text{EIRP}_s \gamma_j$  представляет часть мощности  $\text{EIRP}_s$ , принятой  $j$ -м наземным терминалом, а  $N_g$  – это спектральная плотность мощности шума, созданного и внесенного оборудованием приемной станции. Уравнение (5) описывает саму суть пропорционального разделения в ретрансляторе мощности канала «спутник-земля» между различными пользователями и шумом. Перепишем уравнение (5), заменив  $\beta$  его эквивалентом  $1/(P_T + N_s W)$ :

$$P_{rj} = \text{EIRP}_s \gamma_j \times \quad (6)$$

$$\times \left( \frac{A_i P_i}{P_T + N_s W} + \frac{P_T - A_i P_i}{P_T + N_s W} + \frac{N_s W}{P_T + N_s W} \right) + N_g W.$$

Запишем уравнение (6) для облегчения дальнейших рассуждений словами:

$$P_{rj} = \text{EIRP}_s \gamma_j \left( \frac{\text{мощность } S_i(UL)}{\text{общая мощность } (S+N)(UL)} + \frac{\text{равновесная мощность } S(UL)}{\text{общая мощность } (S+N)(UL)} + \frac{\text{мощность шума } (UL)}{\text{общая мощность } (S+N)(UL)} \right) + N_g W,$$

где  $S$  – мощность сигнала,  $N$  – мощность шума, а  $(UL)$  – канал «земля-спутник» (uplink).

Можно ли из уравнения (6) определить важную связь, которая должна существовать между пользователями, совместно использующими нерегенеративный транспондер? Пользователи должны взаимодействовать, не превышая договорные уровни мощности передачи. Из уравнения (6) видно, что часть мощности  $\text{EIRP}$  канала «спутник-земля», выделенной определенному пользователю или относящейся к шуму канала, определяется отношением мощности этого пользователя к общей мощности суммарного сигнала плюс мощность шума. Следовательно, если один из пользователей, совместно использующих канал, решит «смошенничать» путем увеличения мощности своего сигнала, результатом будет улучшение уровня сигнала этого пользователя за счет сигналов других пользователей. Заметим также из уравнения (6), что шум канала «земля-

спутник» использует ресурс канала «спутник-земля» наравне с другими пользователями. Такое включение шума канала «земля-спутник» в канал «спутник-земля» является отличительной особенностью нерегенеративных ретрансляторов.

Из уравнения (6) отношение  $P_r/N$  сигнала, переданного  $i$ -м передатчиком и принятого  $j$ -м терминалом, равно следующему:

$$\left( \frac{P_r}{N_0} \right)_{ij} \approx \frac{\text{EIRP}_s \gamma_j [A_i P_i / (P_T + N_s W)]}{\text{EIRP}_s \gamma_j [N_s W / (P_T + N_s W)] + N_g W}. \quad (7)$$

Общее отношение  $P_r/N_0$  сигнала, переданного  $i$ -м передатчиком и принятого  $j$ -м терминалом, равно следующему:

$$\left( \frac{P_r}{N_0} \right)_{ij} \approx \frac{\text{EIRP}_s \gamma_j \beta A_i P_i}{\text{EIRP}_s \gamma_j \beta N_s + N_g}. \quad (8)$$

Уравнения (6)–(8) показывают, что шум ретранслятора уменьшает общее значение параметра SNR двумя способами – он «крадет» мощность  $\text{EIRP}$  канала «спутник-земля» и вносит вклад в общий шум системы. Если спутниковый шум канала «земля-спутник» доминирует, т.е. при  $P_T \ll N_s W$ , говорят, что *передача ограничена каналом «спутник-земля»*, и большая часть мощности  $\text{EIRP}_s$  канала «спутник-земля» бесполезно выделяется мощности шума канала «земля-спутник». В этом случае и, если  $\text{EIRP}_s \gamma_j \gg N_g W$ , уравнение (8) можно переписать следующим образом:

$$\left( \frac{P_r}{N_0} \right)_{ij} \approx \frac{\text{EIRP}_s \gamma_j A_i P_i / N_s W}{(\text{EIRP}_s \gamma_j / W) + N_g} \approx \frac{A_i P_i}{N_s}. \quad (9)$$

Уравнение (9) показывает, что при передаче, ограниченной каналом «земля-спутник», общее отношение  $P_r/N_0$  практически совпадает с SNR канала «земля-спутник». Более распространенной является *передача, ограниченная каналом «спутник-земля»*, когда  $P_T \gg N_s W$  и мощность  $\text{EIRP}$  спутника ограничена. В этом случае уравнение (8) можно переписать следующим образом:

$$\left( \frac{P_r}{N_0} \right)_{ij} = \frac{\text{EIRP}_s \gamma_j A_i P_i / P_T}{N_g}. \quad (10)$$

Затем мощность транспондера распределяется между различными сигналами канала «земля-спутник»; небольшой шум канала «земля-

спутник» передается по каналу «спутник-земля». Производительность ретранслятора в этом случае ограничена параметрами канала «спутник-земля».

Оценить производительность, описанную в уравнении (8), можно, используя значения  $E_b/N_0$  или  $P_r/N_0$  каналов «земля-спутник» и «спутник-земля», объединенные следующим образом (при отсутствии комбинационных помех):

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{общ}}^{-1} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_u^{-1} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_d^{-1}. \quad (11)$$

Здесь индексы *общ*, *u* и *d* обозначают, соответственно, общее значение  $E_b/N_0$ , а также значения в канале «земля-спутник» (uplink) и «спутник-земля» (downlink).

Большинство коммерческих спутниковых транспондеров являются нерегенеративными. Однако очевидно, что в будущем коммерческие системы будут требовать встроенной обработки, коммутации или выборочной адресации сообщений и будут использовать регенеративную ретрансляцию для преобразования принятых сигналов в биты сообщений. Помимо возможности

внедрения сложной обработки данных, одной из важных особенностей регенеративных ретрансляторов, по сравнению с нерегенеративными, является то, что каналы «земля-спутник» и «спутник-земля» разделяются, так что шум из первого не переходит во второй. Использование регенеративных спутниковых ретрансляторов позволяет значительно улучшить значения  $E_b/N_0$ , которые необходимы в обоих каналах, относительно значений, требуемых современными нерегенеративными ретрансляторами. В канале «земля-спутник» наблюдалось [1] увеличение  $E_b/N_0$  порядка 5 дБ, а в канале «спутник-земля» – 6.8 дБ (использовалась когерентная модуляция QPSK с  $P_B = 10^{-4}$ ).

#### Резюме

Регенеративті емес спутниктік ретранслятормен спутниктік байланыстағы биттік қателердің жалпы ықтималдығын есептеу қарастырылған.

#### Summary

In article nonregenerative satellite retransmitters are considered and the general probability of the bit's mistake in a satellite communication is calculated.

ЕНУ им. Л. Н. Гумилева  
г. Астана

Поступила 24.12.07г.