

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

## **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Когда говорим о канале связи, какую часть системы мы подразумеваем? Это физический канал или область между передатчиком и приемником? Нет, это нечто большее. Канал представляет собой тракт связи, который начинается с информационного источника, проходит через все

этапы кодирования и модуляции, передатчик, физический канал, приемник (со всеми его этапами обработки) и завершается на получателе информации.

Анализ канала связи и его результат, бюджет канала состоят из вычисления и табулирования

полезной мощности сигнала и паразитной мощности шума в приемнике. Бюджет канала – это расчет баланса потерь и прибыли; он определяет подробное соотношение между ресурсами передачи и приема, источниками шума, поглотителями сигнала и результатами процессов, выполняемых в канале. Некоторые параметры бюджета являются статистическими (например, скидка на замирание сигнала, которое применяется в сотовой связи). Бюджет – это метод оценки, позволяющий определить достоверность передачи системы связи. Основная задача анализа канала связи – это определить действительную рабочую точку системы и установить, что вероятность ошибки, связанная с этой точкой, меньше (или равна) требуемой. Из множества спецификаций, анализов и табличных представлений, используемых для разработки системы связи, бюджет канала занимает особое место и является актуальным.

Изучая бюджет канала, можно многое узнать об общей структуре и производительности системы. Например, из энергетического резерва канала связи можно узнать, как система удовлетворяет многочисленным требованиям – идеально, с натяжкой или вообще не удовлетворяет. Бюджет канала связи может показывать, существуют ли какие-либо аппаратные ограничения и можно ли их компенсировать за счет других частей канала. Вообще, бюджет канала, часто используется для расчета компромиссов системы и изменения телекоммуникационной инфраструктуры; кроме того, он способствует пониманию различных аспектов и взаимозависимостей на уровне подсистем. Исследование бюджета канала и сопровождающей его документации позволяет судить о том, был ли анализ выполнен точно или представляет грубую оценку. Вместе с другими методами моделирования бюджет канала помогает предсказать вес и размер оборудования, первоначальные энергетические требования, технические риски и стоимость системы. Бюджет канала – это один из самых важных параметров управляющего телекоммуникационной инфраструктурой; он представляет «итоговый отчет» по поиску оптимальной производительности системы телекоммуникационной инфраструктуры.

Среда распространения, или электромагнитный тракт связи, соединяющий передатчик и

приемник, называется каналом. Вообще, каналы связи могут состоять из проводников, коаксиальных и оптоволоконных кабелей, а также (в случае передачи в радиодиапазоне частот) волноводов, атмосферы или открытого пространства. Для большинства наземных каналов связи пространство канала проходит через атмосферу. Для спутниковых каналов связи канал, в основном, проходит через открытое пространство. Следует напомнить, что хотя некоторые атмосферные явления происходят на высоте до 100 км, основная часть атмосферы лежит все же ниже 20 км. Следовательно, на атмосферу приходится только небольшая часть (0,05%) общей длины (35 800 км) тракта связи. В данном случае рассматривается анализ канала связи телекоммуникационной инфраструктуры на основе спутниковой связи «KazSat».

Понятие открытого пространства подразумевает канал, свободный от любых помех распространению в диапазоне радиочастот, таких как поглощение, отражение, преломление или дифракция. Если часть канала приходится на атмосферу, эта часть должна быть однородной и удовлетворять всем указанным условиям. Предполагается, что земля находится бесконечно далеко (или что ее коэффициент отражения пренебрежимо мал). Предполагается также, что энергия, передаваемая на радиочастотах, является функцией только расстояния от передатчика (и, как в оптике, подчиняется закону обратных квадратов). Каналы открытого пространства описывают идеальный тракт распространения радиочастот; на практике распространение через атмосферу и возле поверхности земли подвержено поглощению, отражению, дифракции и рассеиванию, что корректирует передачу в открытом пространстве.

Анализ зарубежных работ [1] в области анализа канала связи показывает, что существует две основные причины снижения достоверности передачи. Первая – это уменьшение отношения сигнал/шум. Вторая – это искажение сигнала, которое может быть вызвано межсимвольной интерференцией (intersymbol interference – ISI). В данной статье рассмотрим «бухгалтерию» усиления и рассеивания мощности сигнала. В бюджет канала мы не будем включать межсимвольную интерференцию, поскольку ее особенностью

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

является то, что повышение мощности сигнала не всегда устраняет искажение, вызванное ISI.

Для цифровой связи вероятность ошибки зависит от отношения  $E_b/N_0$  в приемнике определяется следующим образом:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \left( \frac{W}{R} \right).$$

Другими словами,  $E_b/N_0$  – это мера нормированного отношения сигнал/шум ( $S/N$  или  $SNR$ ). Если не оговорено другое, под  $SNR$  подразумевается отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума. Сигналом может быть информационный сигнал, видеоимпульс или модулированная несущая. Уменьшение  $SNR$  может происходить двумя способами: (1) путем снижения желаемой мощности сигнала и (2) посредством повышения мощности шума или мощности сигналов, интерферирующих с полезным сигналом.

Эти механизмы будем называть, соответственно, ослаблением (или потерями) и шумом (или интерференцией). Ослабление происходит при поглощении, отклонении или отражении части сигнала при его прохождении к заданному приемнику; таким образом, часть переданной энергии не доходит до пункта назначения. Существует несколько источников электрических шумов и интерференции, возникающих вследствие различных механизмов, – тепловой шум, галактический шум, атмосферные помехи, помехи от коммутирующих элементов, перекрестные помехи и интерферирующие сигналы от других источников. При промышленном использовании термины потеря и шум часто не различаются, поскольку их эффект на систему одинаков.

Основная задача бюджета канала – доказать, что система связи будет работать согласно плану; т.е. качество сообщений (достоверность передачи) будет удовлетворять заданным требованиям. Бюджет канала отслеживает «потери» и «прибыли» (усиление и ослабление) передаваемого сигнала от начала его формирования в передатчике до полного получения в приемнике. Вычисления показывают, чему равно отношение  $E_b/N_0$  в приемнике и какой запас прочности существует. Процесс вычисления бюджета канала начинается с дистанционного уравнения, связывающего принятую мощность с расстоянием между передатчиком и приемником. Вывод этого уравнения дан ниже.



Рис. 1. Дистанционное уравнение.  
Выражение принятой мощности через расстояние

В системах радиосвязи несущая распространяется от передатчика с помощью передающей антенны. Передающая антenna – это устройство, преобразовывающее электрические сигналы в электромагнитные поля. В приемнике принимающая антenna выполняет обратное преобразование; она превращает электромагнитные поля в электрические сигналы. Вывод уравнения, связывающего приемник и передатчик, обычно начинается с рассмотрения ненаправленного источника радиоизлучения, равномерно передающего в  $4\pi$  стерадиан. На рис. 1 показан идеальный источник, называемый изотропным излучателем (isotropic radiator). Поскольку площадь поверхности сферы радиуса  $d$  равна  $4\pi d^2$  плотность мощности  $p(d)$  данной сферы с центром в источнике излучения связана с переданной мощностью  $P_t$ .

$$p(d) = \frac{P_t}{4\pi d^2} \text{ Вт/м}^2. \quad (1)$$

Для  $d$ , значительно превышающего длину распространяющейся волны ( дальняя зона), мощность, извлеченную на принимающей антenne, равна

$$P_r = p(d)A_{er} = \frac{P_t A_{er}}{4\pi d^2}. \quad (2)$$

Здесь параметр  $A_{er}$  – это сечение захвата (эффективная площадь) принимающей антены, определяемое следующим образом:

$$A_{er} = \frac{\text{полная извлеченная мощность}}{\text{плотность падающей мощности}}. \quad (3)$$

Если рассматриваемая антена является передающей, ее эффективная площадь обозначается как  $A_{er}$ . Если не указано, выполняет ли антена

принимающую или передающую функцию, эффективная площадь обозначается через  $A_e$ .

Эффективная площадь антенны  $A_e$  и ее физическая площадь поверхности  $A_p$  связаны коэффициентом эффективности  $\eta$ :

$$A_e = \eta A_p. \quad (4)$$

Это говорит о том, что не вся падающая мощность была извлечена; вследствие различных механизмов [1] происходят потери. Номинальное значение  $\eta$  для параболической антенны составляет 0,55, а для рупорной – 0,75.

Определим параметр антенны, который связывает выходную (или входную) мощность с мощностью изотропного излучателя и именуется коэффициентом направленного действия (КНД):

$$G = \frac{\text{максимальная интенсивность мощности}}{\text{средняя интенсивность мощности в диапазоне } 4\pi \text{ стерадиан}}. \quad (5)$$

При отсутствии любых диссипативных потерь или потерь вследствие несогласованности импедансов коэффициент направленного действия антенны (в направлении максимальной интенсивности излучения) определяется из формулы (5). В то же время, если существует некоторая диссипация или несогласованность, коэффициент направленного действия антенны уменьшается на множитель, соответствующий этим потерям. В данной статье будем предполагать, что диссипативные потери равны нулю, а импедансы согласованы идеально. Таким образом, формула (5) описывает максимальный коэффициент направленного действия антенны; как показано на рис. 2, его можно рассматривать как результат концентрации изотропного излучения в некоторой ограниченной области, меньшей  $4\pi$  стерадиан. Теперь мы можем определить эффективную излученную

мощность относительно изотропного излучателя (эффективная изотропно-излучаемая мощность – effective isotropic radiated power, EIRP) как произведение переданной мощности  $P_r$  и коэффициента направленного действия передающей антенны  $G_t$ :

$$\text{EIRP} = P_r G_t. \quad (6)$$

Если антенна передатчика имеет некоторый коэффициент направленного действия относительно изотропной антенны, в уравнении (2) мы меняем  $P_r$  на EIRP, что дает следующее:

$$P_r = \text{EIRP} \frac{A_{er}}{4\pi d^2}. \quad (7)$$

Связь между КНД антенны  $G$  и эффективной площадью  $A_e$  определяется следующим образом:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (\text{для } A_e \gg \lambda^2). \quad (8)$$

Здесь  $\lambda$  – длина волны несущей. Длина волны  $X$  и частота / связаны соотношением  $\lambda = c/f$ , где  $c$  – скорость света ( $= 3 \cdot 10^8$  м/с). Теорема взаимности утверждает, что для данной антенны при данной длине волны КНД приема и передачи идентичны.

Зона обзора антенны является величиной телесного угла, в котором сконцентрирована большая часть мощности поля. Зона обзора – это мера анизотропных свойств антенны, она обратно пропорциональна усилиению антенны, т.е. антеннам с большим КНД соответствует более узкая зона обзора. Часто зону обзора выражают не через телесный угол, а через плоский угол раскрытия антенны (beamwidth), измеряемый в радианах или градусах. На рис. 2 показана диаграмма направленности антенны и дана иллюстрация общего определения угла раскрытия антенны. Угол раскрытия – это угол, образованный точками, в которых максимальная мощность поля ослаблена на 3 дБ. Как угол раскрытия зависит от частоты

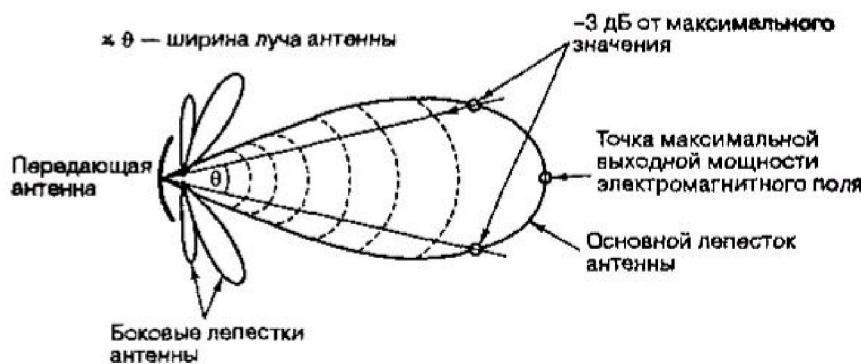


Рис. 2. Коэффициент направленного действия антенны – результат концентрации изотропного излучения

сигнала и размера антенны? Из уравнения (8) можно видеть, что КНД увеличивается с уменьшением длины волны (увеличением частоты); также КНД антенны увеличивается с увеличением эффективной площади. Увеличение КНД антенны равносильно фокусировке плотности потока энергии в меньшем угле раскрыва; следовательно, увеличение частоты сигнала или размера антенны приводит к сужению угла раскрыва.

Эффективную площадь изотропной антенны можно вычислить, положив в уравнении (8)  $G=1$ , что позволяет получить следующее выражение для  $A_e$ :

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi}. \quad (9)$$

Затем для нахождения принятой мощности  $P_r$ , при изотропной принимающей антенне, подставляем уравнение (9) в уравнение (7), что дает следующее:

$$P_r = \frac{\text{EIRP}}{(4\pi d/\lambda)^2} = \frac{\text{EIRP}}{L_s}. \quad (10)$$

Здесь совокупность коэффициентов  $(4\pi d/\lambda)^2$  называется потерями в тракте (path loss) или потерями в свободном пространстве (free-space loss) и обозначается через  $L_s$ . Формула (10) показывает, что мощность, принятая изотропной антенной, равна эффективной переданной мощности, сниженной только за счет потерь в тракте связи. Если принимающая антenna не является изотропной, то после замены в уравнении (7)  $A_{er}$ , выражением  $G_r \lambda^2/4\pi$  из уравнения (8) получаем более общую формулу:

$$P_r = \frac{\text{EIRP} G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} = \frac{\text{EIRP} G_r}{L_s}, \quad (11)$$

где  $G_r$  – КНД принимающей антенны. Полученное уравнение (11) называется дистанционным.

Поскольку и передающую, и принимающую антенны можно определить через КНД или площадь,  $P_r$  можно выразить четырьмя различными способами:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_{er}}{4\pi d^2}, \quad (12)$$

$$P_r = \frac{P_t A_{et} A_{er}}{\lambda^2 d^2}, \quad (13)$$

$$P_r = \frac{P_t A_{et} A_r}{4\pi d^2}, \quad (14)$$

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2}. \quad (15)$$

В этих выражениях  $A_{er}$  и  $A_{et}$  – эффективные площади принимающей и передающей антенн.

В уравнениях (12)–(15) зависимая переменная – это мощность принятого сигнала  $P_r$ , а независимые переменные – это такие параметры, как переданная мощность, КНД антенны, площадь антенны, длина волны и расстояние между антеннами. Допустим, возник вопрос: как меняется принятая мощность при увеличении длины волны (или уменьшении частоты), при фиксированных остальных параметрах? Если рассматривать уравнения (12) и (14), то кажется, что  $P_r$  и длина волны вообще не связаны. Из уравнения (13) величина  $P_r$  вроде бы обратно пропорциональна квадрату длины волны, а из уравнения (15) она прямо пропорциональна квадрату длины волны. Нет ли здесь противоречия? Разумеется, нет; кажущаяся противоречивость уравнений (12)–(15) исчезает, если вернуться к формуле (5.8) и вспомнить, что КНД антенны и ее площадь связаны через длину волны. Когда следует употреблять каждое из уравнений (12)–(15) для определения зависимости  $P_r$  от длины волны? Представим уже сконструированную систему, т.е. антенны уже построены (записаны  $A_{et}$  и  $A_{er}$ ). В этом случае подходящим выбором для вычисления  $P_r$  является уравнение (13), сформулированное для антенн фиксированного размера. Из этого уравнения видим, что принятая мощность увеличивается при уменьшении длины волны.

Рассмотрим уравнение (12), где независимыми переменными являются  $G_t$  и  $A_{er}$ . Итак, желательно, чтобы  $G_t$  и  $A_{er}$  были фиксированными при вычислении зависимости  $P_r$  от длины волны. Как изменится усиление при передаче на фиксированное расстояние, если уменьшить независимую переменную  $\lambda$ ?  $G_t$  увеличится (см. уравнение (8)). Но мы не хотим увеличения  $G_t$  – оно нужно нам фиксированным. Другими словами, чтобы обеспечить неизменность  $G_t$  нам необходимо уменьшать размер передающей антенны при уменьшении длины волны. Рассуждая подобным образом, мы приходим к выводу, что уравнение (12) удобно использовать при фиксированном КНД передающей антенны (или раскрытии антенны) и при переменном параметре  $A_{er}$ . Подобным образом уравнение (14) используется при фиксированных

$A_{et}$  и  $G_r$ , а уравнение (15) – при фиксированных КНД передающей и принимающей антенн (или раскрыях антенн).

На рис. 3 показано спутниковое приложение, где для обзора земной поверхности требуется луч со спутниковой антенны (раскрыв антенны равен порядка 17°). Поскольку КНД спутниковой антенны  $G$ , должен быть фиксированным, результирующая мощность  $P_r$  (см. уравнение (12)) не зависит от длины волны. Если передача ведется на определенной частоте  $f_1 (=c/\lambda)$ , то изменение ее на  $f_2$ , где  $f_2 > f_1$ , приведет к уменьшению обзора (поскольку при данной антенне увеличится  $G_r$ ); таким образом, для поддержания требуемого обзора или раскрыве антенны размер этой антенны должен быть уменьшен. Итак, при увеличении несущей частоты антенны обзор земной поверхности уменьшается.

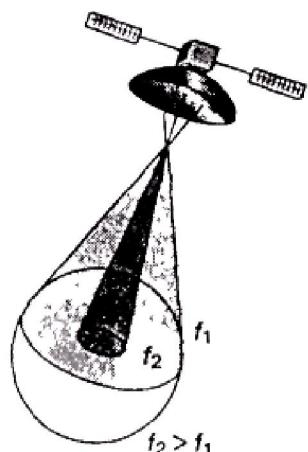


Рис. 3. Принятая мощность как функция частоты

Из уравнения (10) можно видеть, что потери в тракте  $L_s$ , зависят от длины волны (частоты). Довольно часто возникает вопрос: почему потери в тракте, подчиняющиеся простому геометрическому закону ослабления (ослабление обратно пропорционально квадрату расстояния), зависят от частоты? Ответ заключается в том, что потери в тракте, выраженные в уравнении (10), определены для изотропной принимающей антенны ( $G_r = 1$ ). Вообще, потери в тракте – это весьма удобный параметр; он представляет гипотетическую потерю мощности, которая произойдет, если принимающая антenna будет изотропной. Из рис. 1 и уравнения (1) видно (из чисто геометрических соображений), что плотность мощности  $p(d)$  – это функция расстояния,  $p(d)$  не

является функцией частоты. В то же время, поскольку потери в тракте заданы для  $G_r = 1$ , когда мы находим некоторую мощность  $P_r$  с помощью изотропной антенны, результат описывается выражением (10). Снова акцентируем внимание на том, что  $L_s$  можно рассматривать как совокупность параметров, которой было присвоено неудачное имя потери в тракте. Название представляет чисто геометрический эффект и не акцентирует внимания на том, что  $G_r = 1$ . Пожалуй, лучшим названием было бы потери распространения при единичном КНД. В системах радиосвязи потери в тракте – это наибольший одиночный источник ослабления мощности сигнала. В спутниковых системах потери в тракте канала связи со спутником в полосе С (6 ГГц) обычно составляют порядка 200 дБ.

Тепловой шум вызывается тепловым движением электронов во всех проводящих элементах. Он создается в местах соединения антенны и приемника и в первых каскадах приемника. Спектральная плотность мощности шума постоянна для всех частот, вплоть до  $10^{12}$  Гц, что определило название белый шум. Процесс теплового шума в приемниках системы связи моделируется как процесс аддитивного белого гауссова шума (additive white Gaussian noise – AWGN). Термин «аддитивный» означает, что шум просто накладывается на сигнал или добавляется к нему – никаких мультипликативных механизмов не существует. Физическая модель теплового шума – это генератор шума со среднеквадратическим напряжением холостого хода, равным  $4kTWR$ , где  $k$  (постоянная Больцмана) =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К или Вт/КГц = -228,6 дБВт/КГц,  $T^\circ$  – температура, Кельвин,  $W$  – ширина полосы, Герц и  $R$  – сопротивление, Ом.

Максимальная мощность теплового шума  $N$ , которую можно подать с выхода генератора шума на вход усилителя, равна

$$N = \kappa T^\circ W \text{ Ватт}. \quad (16)$$

Следовательно, максимальная номинальная односторонняя спектральная плотность мощности шума  $N_0$  (мощность шума на 1 Гц полосы) на выходе усилителя равна

$$N_0 = \frac{N}{W} = \kappa T^\circ \text{ Ватт/Герц}. \quad (17)$$

Может показаться, что мощность шума должна зависеть от значения сопротивления – но это

не так. Рассмотрим такой аргумент. Соединим электрически большое и малое сопротивление так, чтобы они образовали замкнутую пару и их физические температуры были одинаковы. Если бы мощность шума зависела от сопротивления, то наблюдался бы поток полезной мощности от большего сопротивления к меньшему; большее сопротивление охлаждалось бы, а меньшее – нагревалось. Но это противоречит нашему жизненному опыту, не говоря уже о втором начале термодинамики. Следовательно, мощность, поступающая от большего сопротивления к меньшему, должна равняться мощности, получаемой этим большим сопротивлением.

Как видно из уравнения (16), мощность, подаваемая источником теплового шума, зависит от температуры окружающей среды источника (шумовой температуры). Это позволяет ввести для источников шума полезное понятие эффективной шумовой температуры (причем источники не обязательно должны быть тепловыми по природе – галактика, атмосфера, интерферирующие сигналы), влияющей на работу принимающей антенны. Эффективная шумовая температура подобного источника шума определяется как температура гипотетического источника теплового шума, дающего эквивалентную паразитную мощность.

*Евразийский национальный  
университет им. Л. Гумилева,  
г. Астана*

*Поступила 10.09.07г.*