

Тогда оценка (3) является строго состоятельной, то есть $\hat{\vartheta}_T \xrightarrow{T \rightarrow \infty} \vartheta_0$ п.н.

Теорема 2. Пусть выполняются следующие условия:

1. $\vartheta_0 \in \dot{\Xi}$, где $\dot{\Xi}$ – внутреннее множество $\Xi := \Theta \times \Lambda$;
2. $\forall \theta \in \Theta, \omega_1 + \omega_2 < 1$;
3. $W(\cdot)$ является строго положительной на $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ и $\int_{-\infty}^{\infty} |u|^i W(u) du < \infty$,
 $i \in \{0, 1, 2, 4\}$.

Тогда существует последовательность матриц G_T стремящаяся п.н. к G и $G_T \sqrt{T} (\vartheta_T - \vartheta_0) \xrightarrow{d} \mathcal{N}(0, V)$ при $T \rightarrow \infty$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Bollerslev T. Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity // J. Econometrics. 1986. Vol. 31. № 2. P. 307–327.
2. Терех В. С. Применение умеренно устойчивых распределений в моделях GARCH(1, 1) // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. 2018. № 1. С. 48–58.
3. Trusz M., Tserakh U. GARCH(1,1) models with stable residuals // Studia Informatica. 2018. Vol. 22. P. 47–57.
4. Francq C., Meintanis S. G. Fourier-type estimation of the power GARCH model with stable-paretian innovations // Metrika. 2016. Vol. 79, №. 4. P. 389–424.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРАКТА ЦИФРОВОГО СПУТНИКОВОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО СИГНАЛА

А. С. Шпак, А. В. Поляков

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

E-mail: anitashpak@gmail.com

Предложена математическая модель для энергетического расчета радиолинии на трассе спутник-Земля, позволяющая с помощью компьютерного моделирования определить параметры приемного устройства, обеспечивающие устойчивый прием цифрового спутникового телевизионного сигнала при различных погодных условиях, температурах окружающей среды и географических координатах для наиболее часто используемых типов фазовой модуляции.

Ключевые слова: Ключевые слова: цифровое спутниковое телевидение; устойчивый прием; фазовая модуляция; вероятность ошибки; отношение сигнал/шум

Спутниковое телевидение является одним из наиболее динамично развивающихся видов связи, который зачастую является единственно возможным способом предоставления информационных услуг в трудно-

доступных и удаленных регионах. Подавляющая часть существующих спутниковых систем связи использует для размещения спутниковых ретрансляторов (СР) геостационарную орбиту, основными достоинствами которой являются возможность непрерывной круглосуточной связи и практически полное отсутствие доплеровского сдвига частоты. Вследствие этого, при достижимых на сегодняшний день точностях удержания СР в рабочей точке на орбите и систем ориентации бортовых антенн на земную станцию нет необходимости использовать достаточно сложные и дорогие следящие системы наведения антенн. Запуск первого белорусского геостационарного спутника «BELINTERSAT-1» обеспечил присутствие Республики Беларусь на телекоммуникационной мировой арене. В последующих расчетах будем опираться на технические характеристики системы «BELINTERSAT-1», соответствующие территории Республики Беларусь.

Спутник «BELINTERSAT-1» вещает в формате DVB-S с использованием помехоустойчивого кодирования на основе блочных кодов Рида – Соломона. Для анализа качества передачи информации обычно пользуются такой характеристикой как вероятность ошибки BER (Bit Error Rate) при приеме цифровых сигналов. Вероятность ошибки в зависимости от отношения сигнал/шум, нормированное на ширину полосы и скорость передачи битов (E_b/N_0), записывается следующим образом [1]:

$$BER\left(\frac{E_b}{N_0}\right) \approx 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{3\log_2(M)}{2(M-1)} \cdot \frac{E_b}{N_0}}\right), \quad (1)$$

Применение QPSK-модуляции позволяет обеспечить устойчивый прием при битовом соотношении сигнал-шум на входе спутникового ТВ-приемника до 6 дБ, поскольку коды Рида-Соломона начинают эффективно устойчиво работать при пороговых значениях preBER не более $2 \cdot 10^{-4}$. В то же время, согласно рекомендациям спецификацией ETS 300421 и ГОСТ Р 52023 Российской Федерации, для обеспечения круглогодичного приема спутникового цифрового телевидения, значение E_b/N_0 должно быть не менее 10 дБ [2, 3]. В этом случае, с учетом корректирующего коэффициента при использовании кода Рида-Соломона с учетом того, что для MPEG-2 $R=15-25$ Мбит/с, для MPEG-4 $R=8-12$ Мбит/с и ширина полосы сигнала $W=6-8$ МГц, минимальное значение отношения сигнал/шум должно составлять [1]:

$$P_c / P_{ш} = E_b / N_0 + 10\lg(R/W) + 10\lg(204/188) = 15,3 \text{ дБ}. \quad (2)$$

На рис. 1 представлены результаты расчета вероятности ошибки приема цифрового спутникового сигнала preBER в зависимости от величины отношения сигнал/шум на входе телевизионного приемника, полученные с помощью формул (1)–(2) для различных типов фазовой моду-

ляции. Из полученных графиков следует, что увеличение объема передаваемой информации за счет выбора соответствующего типа модуляции требует большего значения SNR при той же величине BER.

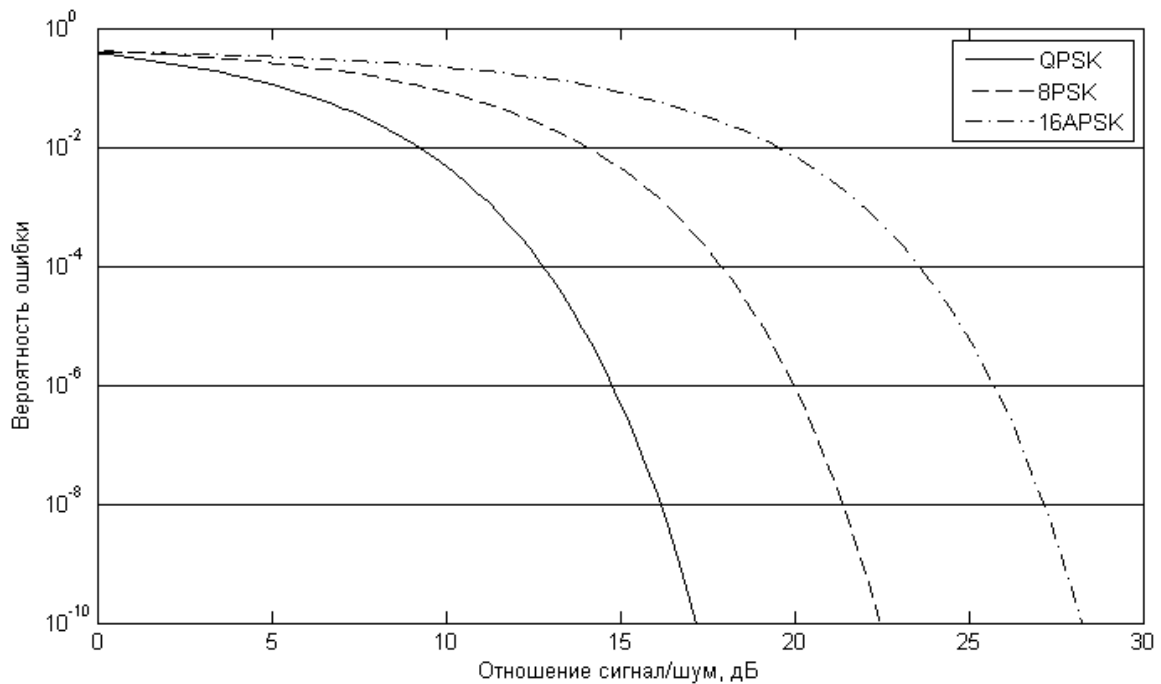


Рис. Зависимость вероятности ошибки приема сигналов цифрового спутникового телевидения от отношения сигнал/шум на входе телевизионного приемника при различных типах модуляции с использованием кодов Рида–Соломона

Линия спутниковой связи состоит из двух участков: Земля – спутник и спутник–Земля. Основной их особенностью является большая физическая протяженность и, как следствие этого, возникновение значительных потерь сигнала, обусловленных затуханием его энергии в пространстве. На приемное устройство спутника и земной станции кроме собственных флуктуационных шумов воздействуют разного рода помехи в виде излучения Космоса, Солнца, планет и атмосферных газов. Правильный учет влияния всех факторов позволяет оптимально спроектировать систему, обеспечить ее уверенную работу в наиболее трудных условиях и в то же время исключить излишние энергетические затраты, которые могут привести к неоправданному увеличению сложности земной и бортовой аппаратуры.

Отношение сигнал/шум на входе абонентского приемника задается выражением:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right) = \frac{P_{исз} G_{пр} G_k G_{тр} \eta_{сп} \eta_{ап}}{L_0 L_{доп} k T_{пр} \Delta f_{ша} a_{са} L_3 L_{\phi}}, \quad (3)$$

где $\Delta f_{\text{ша}} = \alpha \cdot 2\Delta f_{\text{пик}}$ – шумовая полоса частот абонентского приемника; $\alpha=1,1$ – коэффициент, определяемый избирательными свойствами приемника; $\Delta f_{\text{пик}} = m_f F_{\text{max}}$ – пиковая девиация частоты, F_{max} – верхняя частота видеосигнала (для отечественного стандарта $F_{\text{max}}=6$ МГц); $P_{\text{исз}}$ – мощность бортового передатчика ($P_{\text{исз}} \approx 54,2$ дБВт); $S_p = q(\pi D^2/4)$ – геометрическая площадь раскрыва антенны; q – коэффициент использования поверхности ($q=0,5 \dots 0,75$); $G_{\text{тр}} = D_{\text{кнд}} \eta$ – коэффициент усиления антенны абонентского приемника; $D_{\text{кнд}} = 4\pi S_p / \lambda^2$ – коэффициент направленного действия антенны; η – КПД антенны; D – диаметр антенны; f – рабочая частота; $\eta_{\text{сп}} = \eta_{\text{ап}} = 0,7-0,9$ – КПД фидеров на спутнике и в абонентском приемнике; k – постоянная Больцмана; G_k – коэффициент усиления конвертера; $G_{\text{тр}}$ – коэффициент усиления транзисторных смесителей, выполненных на полевых транзисторах Шоттки; L_3 – затухание мощности сигнала в коаксиальном кабеле; $L_{\text{ф}}$ – потери полосового фильтра; $a_{\text{са}}$ – коэффициент запаса на участке спутник-абонентский приемник

Расстояние между земной станцией и спутником находится с использованием геометрических соотношений:

$$d = \sqrt{R_3^2 \sin^2 \gamma + H^2 + 2R_3 H - R_3 \sin \gamma}, \quad (4)$$

где R_3 – радиус Земли, км; $R_3=6371$ км; H – высота орбиты над экватором Земли, км (35 786 км).

Угол места γ находится при допущении, что Земля является неидеальным шаром, а возвышение земной станции над уровнем моря нулевое:

$$\gamma \approx \arcsin \frac{H \cos \varphi_{\text{зс}} \cos(\lambda_{\text{с}} - \lambda_{\text{зс}}) - R_3}{\sqrt{H^2 + R_3^2 - 2HR_3 \cos \varphi_{\text{зс}} \cos(\lambda_{\text{с}} - \lambda_{\text{зс}})}}, \quad (5)$$

где $\lambda_{\text{с}}$ – точка стояния спутника на геостационарной орбите; $\varphi_{\text{зс}}$ и $\lambda_{\text{зс}}$ – координаты земной станции точки приема видеосигнала.

Ослабление сигнала в свободном пространстве:

$$L_0 = 20 \lg(4,189 \cdot 10^4 df), \text{ дБ}, \quad (6)$$

В наиболее общем случае величину дополнительных потерь $L_{\text{доп}}$ в реальных условиях можно представить следующим образом:

$$L_{\text{доп}} = L_a + L_d + L_n + L_{\text{п}}, \quad (7)$$

где L_a – потери в спокойной атмосфере; L_d – потери в осадках; L_n – потери из-за рефракции и неточности наведения антенн; $L_{\text{п}}$ – поляризационные потери.

Шумовая температура земного приемника определяется: 1) мощностью собственных шумов приемного устройства и мощностью шумов

антенно-волноводного тракта; 2) мощностью шумов антенны при воздействии на нее теплового излучения Земли от атмосферы; 3) мощностью шумов радиоизлучения Солнца и других космических источников; 4) шумовой температурой конвертера, и описывается выражением

$$T_{\text{пр}} = T_{\text{ус}} + T_{\text{АФТ}} + \left(\frac{T_{\text{атм}} + T_{\text{кос}}}{\eta_{\text{ап}}} \right) + T_{\text{к}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{ус}}$ – определяется входными цепями и типом малошумящего усилителя высокой частоты; $T_{\text{к}}$ – шумовая температура конвертера; $T_{\text{АФТ}} = T_0(1 - \eta_{\text{ап}})$, где: $T_0 = 290$ К – абсолютная температура; $T_{\text{атм}}$ – является функцией угла места и частоты; $T_{\text{кос}}$ – определяется яркостной температурой источника $T_{\text{я}}$.

Потери в осадках вычисляются по эмпирической формуле:

$$L_{\text{д}} = aI^b l [\text{дБ}], \quad (9)$$

где: I – интенсивность выпадения осадков [мм/ч], l – длина пути сигнала в дождевом слое, a и b – вспомогательные коэффициенты.

Таким образом, разработана математическая модель (1)–(9) для энергетического расчета радиолинии на трассе спутник-Земля, позволяющая с помощью компьютерного моделирования определить параметры приемного устройства, обеспечивающие устойчивый прием цифрового спутникового телевизионного сигнала при различных погодных условиях и географических координатах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Песков С. Н., Ищенко А. Е. Расчет вероятности ошибки в цифровых каналах связи // Теле-Спутник. 2010. № 11. С. 70–75.
2. Конорев, А. Особенности измерения параметров каналов с цифровой модуляцией / А. Конорев // Теле-Спутник. – 2010. – № 9. – С. 14–23.
3. Никитин Н. П., Лузин В. И., Гадзиковский В. И., Марков Ю. В. Телевизионные цифровые системы: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2016. 108 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

И. Н. Щербак, Е. Е. Попко

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

E-mail: shcherbak_igor@tut.by

Экзоскелет – устройство, позволяющее увеличить массу переносимого груза. Первый этап разработки экзоскелета – создание биомеханической модели движений человека. Использованный ранее способ описания движения с использованием углов