

УДК 654.165

Математическая модель канала управления стандарта радиосвязи GSM-R

А. М. Болдинов, А. А. Привалов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Болдинов А. М., Привалов А. А. Математическая модель канала управления стандарта радиосвязи GSM-R // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 743–751. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-743-751

Аннотация

Цель: Разработать модель для оценки и анализа качества функционирования логических каналов управления (КУ) стандарта радиосвязи GSM-R. **Методы:** Процесс функционирования совмещенного канала управления представляется в виде стохастической сети с дальнейшим получением эквивалентной функции, среднего времени и функции распределения времени передачи информации в канале передачи данных. **Результаты:** Разработана математическая модель процесса функционирования совмещенных КУ, соответствующая алгоритму установления соединения подвижного пользователя с базовой станцией сети. Результаты моделирования позволяют сделать вывод об адекватности модели и оценить степень влияния помех различной природы в заданном районе, в том числе и создаваемых постановщиками помех нарушителя. Показана целесообразность сокращения времени анализа параметров сигналов, передаваемых от подвижной к базовой станции, а также необходимость повышения помехозащищенности сигналов контроля вхождения в связь, уровня и качества принимаемого сигнала. **Практическая значимость:** Данная модель может быть использована для оценки и анализа эффективности функционирования каналов управления реальных систем подвижной радиосвязи стандарта GSM-R.

Ключевые слова: Радиосвязь, GSM-R, канал связи, канал управления, кадр, стандарт связи, модель.

Актуальность

На основе стандарта связи GSM был разработан стандарт связи, применяемый на железных дорогах, — GSM-R. Стандарт GSM-R разработан для создания сотовых систем подвижной связи (ССПС) в следующих частотных диапазонах: 890–915 МГц — для передачи подвижными стан-

циями; 935–960 МГц — для передачи базовыми станциями [1].

Каждая из полос, выделенных для сетей GSM, разделяется на частотные каналы. Разнос каналов составляет 200 кГц, что позволяет организовать в сетях GSM 124 частотных канала. Каждая частотная несущая содержит 8 физи-

ческих каналов, размещенных в 8 временных окнах в пределах TDMA кадра и в последовательности кадров. Каждый физический канал использует одно и то же временное окно в каждом временном TDMA кадре. До формирования физического канала сообщения и данные, представленные в цифровой форме, группируются и объединяются в логические каналы двух типов: каналы связи — для передачи кодированной речи или данных (ТСН); каналы управления — для передачи сигналов управления и синхронизации (ССН) [2]. Каналы управления (ССН) обеспечивают фактическое соединение между абонентами — установление сигнала и непрерывность соединения.

Каналы управления обеспечивают предоставление подвижным пользователям следующие услуги: коммутация цифровых каналов ПС; обслуживание всех типов вызовов как к подвижным абонентам, так и от них в объеме услуг, предоставляемых каналом; управление радиоресурсами сети в процессе вызова; отработка протоколов сигнализации с подсистемой базовых станций (БС); регистрация и определение местоположения ПС; обеспечение непрерывности связи между подвижными абонентами как при перемещении подвижной станции из одной сети в другую, так и функции роуминга; маршрутизация входящих вызовов и обмен информацией с регистрами постоянной приписки; управление передачей данных между ПС и стационарными абонентами с использованием сигналов тонального набора, передача коротких сообщений; перенос параметров шифрования; обработка многочастотной сигнализации и т. д.

Различают четыре вида каналов управления:

– ВССН (Broadcast Control Channels) — каналы передачи сигналов управления, такие как: FССН — канал подстройки частоты несущей,

SCН — канал временной синхронизации и опознавания, ВССН — канал управления передачей;

– СССН (Common Control Channels) — общие каналы управления, такие как: РСН — канал вызова, RACH — канал параллельного доступа, AGCH — канал разрешенного доступа;

– SDCCH (Stand-alone Dedicated Control Channels) — индивидуальные каналы управления, такие как: SDCCH/4 — индивидуальный канал управления, состоящий из 4 подканалов, SDCCH/8 — индивидуальный канал, состоящий из 8 подканалов;

– АССН (Associated Control Channels) — совмещенные каналы управления, такие как: FACCH — быстрый совмещенный канал (эстафетная передача), SACCH — медленный совмещенный канал управления [2].

Из указанных каналов управления наиболее значимыми являются (Broadcast Control Channels) и СССН (Common Control Channels).

Так как данные каналы подвержены воздействию как случайных, так и преднамеренных помех, то оценка качества его функционирования представляет значительный научный и практический интерес.

В работе [3] описывается методика оценки качества услуг передачи речи и видеотелефонии. При этом оценка качества сети проводится по среднему времени установления соединения.

В работе [4] анализируется качество передачи речи, в сети GSM-R, в зависимости от типа применяемого речевого кодека и уровня битовых ошибок в канале связи, на который влияние оказывают различного рода внутрисистемные и межсистемные помехи. На основе полученных данных производится частотно-территориальное планирование сети GSM-R.

В работе [5] представлен анализ основных методов математического моделирования про-

цесса доведения сообщений по низкоскоростным каналам связи с протоколами, поддерживающими процедуру «скользящее окно». На основе выявленных закономерностей процессов передачи информации описан подход по выявлению вероятностно-временных характеристик информационного обмена по каналам сети радиосвязи между смежными узлами коммутации. Применение операторного метода математического моделирования протоколов управления логическим каналом передачи данных позволяет получить вероятностно-временные характеристики процесса доведения многопакетных сообщений.

Представленные работы позволяют оценить качество передачи отдельных команд управления, но не учитывают их взаимосвязи при установлении и поддержании соединения в процессе сеанса связи в условиях деструктивных воздействий нарушителя, а значит, актуализируется задача расчета времени успешной передачи данных в канале управления.

В настоящей статье предлагается модель, основанная на представлении процесса функционирования каналов ВССН в виде стохастической сети с последующим определением функций распределения времени успешного установления соединения между подвижной и базовой станцией.

Анализ алгоритма установления соединений в GSM-R и функционирования каналов управления позволили сформулировать следующую задачу.

Постановка задачи

Пусть имеется совмещенный канал управления, предназначенный для передачи информации, необходимой подвижной станции (ПС), для обеспечения фактического установления соединения и непрерывности соединения между абонентами. Положим, что в некоторый

момент времени ПС А инициировала установление соединения с ПС Б. В этом случае ПС А осуществляет прием кадров по каналам, обеспечивающим входение в связь (КВС) в течение некоторого времени t_v с функцией распределения $V(t)$. При этом с вероятностью P_1 кадр КВС будет принят правильно с первого раза. В противном случае с вероятностью $(1 - P_1)$ кадр КВС будет передавать кадр повторно.

Если кадр КВС принят правильно, то от ПС А к обслуживающей его базовой станции (БС) передаются вычисленные значения параметров: уровень принимаемого сигнала (УПС), качество принимаемого сигнала (КПС) и дистанция, которые с вероятностью P_2 принимаются БС с заданным качеством. С вероятностью $(1 - P_2)$ один из переданных ПС сигналов не будет принят БС с требуемым качеством, тогда в течение некоторого времени t_u с функцией распределения $U(t)$ осуществляется управление уровнем излучаемой мощности (УИМ) ПС.

При этом с вероятностью P_3 сигналы УПС, КПС и дистанции передают повторно. В случае дефицита бюджета мощности с вероятностью $(1 - P_3)$ пользователь ПС А получает отказ от этой БС и начинает прием кадров КВС от другой БС в течение некоторого времени t_r с функцией распределения $R(t)$, и описанный процесс возобновляется. Процесс установления связи по каналу управления с пользователем ПС Б аналогичен вышеописанному.

Требуется определить среднее время и функцию распределения времени успешного установления соединения.

Решение

Для решения поставленной задачи представим процесс функционирования канала управления в виде стохастической сети (рис. 1).

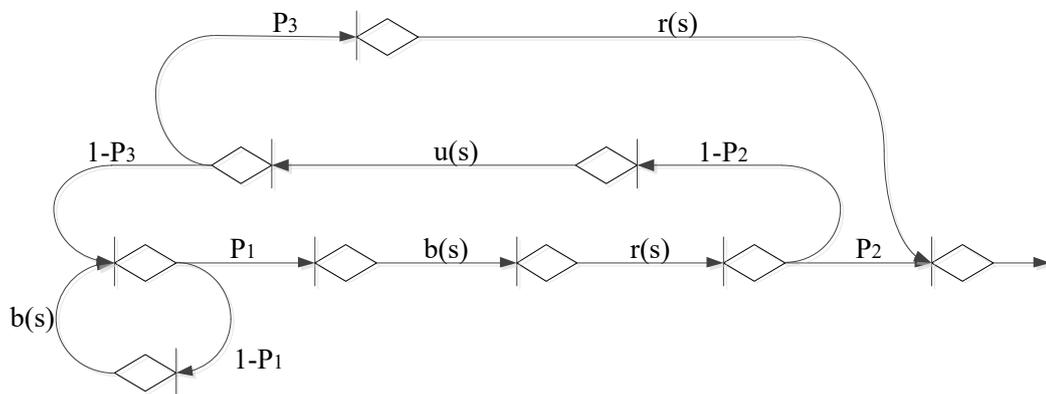


Рис. 1. Стохастическая сеть канала управления системы GSM-R:

P_1 — вероятность успешного приема кадра КВС; P_2 — вероятность успешного приема УПС, КПС и дистанции; P_3 — вероятность успешного приема БС сигналов УПС, КПС и дистанции после регулирования мощности; $b(s)$, $r(s)$ и $u(s)$ — преобразования Лапласа — Стильтьеса функции распределения соответствующих случайных величин, т. е.:

$$b(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} d[B(t)]; r(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} d[R(t)]; u(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} d[U(t)]. \quad (1)$$

Используя уравнения топологического преобразования стохастических сетей, определим эквивалентную функцию стохастической сети:

$$h(s) = \frac{p1 \frac{b(s)}{b(s)+s} \frac{r(s)}{r(s)+s} \left[p2 + (1-p2) \frac{u(s)}{u(s)+s} p3 \frac{r(s)}{r(s)+s} \right]}{1 - (1-p1) \frac{b(s)}{b(s)+s} - (1-p2) \frac{u(s)}{u(s)+s} (1-p3) p1 \frac{b(s)}{b(s)+s} \frac{r(s)}{r(s)+s}}. \quad (2)$$

Полагая, что время передачи соответствующих команд имеет экспоненциальное распределение, представим выражение (2) в виде суммы вычетов:

$$h(s) = \sum_{i=0}^3 \frac{[(bp1r)[(s_i^2)^2 A1 + s_i B1 + C1]]}{(s_i)^3 4 + (s_i)^2 3A2 + (s_i) 2B2 + C2} \cdot \left(\frac{1}{s - s_i} \right), \quad (3)$$

где $A1 = p2$; $A2 = 2r + u + bp1$; $B1 = p2r + p2u$; $B2 = r^2 + 2ru + 2bp1r + bp1u$;

$$C1 = p2ru + p3ru - p2p3ru; C2 = r^2u + bp1r^2 + bp1ru + bp1p2ru + bp1p3ru - bp1p2p3ru;$$

$D2 = bp1p2r^2u + bp1p3r^2u - bp1p2p3r^2u$ — коэффициенты разложения многочленов числителя и знаменателя эквивалентной функции (2).

Осуществляя переход в пространство оригиналов, получим функцию плотности распределения вероятностей:

$$h(t) = \sum_{i=0}^3 \frac{[(bp1r)[(s_i^2)^2 A1 + s_i B1 + C1]]}{(s_i)^3 4 + (s_i)^2 3A2 + (s_i) 2B2 + C2} \cdot e^{s_i t}. \quad (4)$$

Интегрируя выражение (4), определим функцию распределения времени установления соединения между ПС и БС:

$$H(t) = \sum_{i=0}^3 \frac{[(b p_1 r [(s_i)^2 A_1 + s_i B_1 + C_1]] (1 - \exp(-t s_i))}{[(s_i)^3 4 + (s_i)^2 3 A_2 + (s_i) 2 B_2 + C_2] (-s_i)} \quad (5)$$

Кроме того, с использованием (4) можно определить и среднее время установления соединения:

$$T = \int_0^{\infty} t h(t) dt = \sum_{i=0}^3 \frac{[(b p_1 r [(s_i)^2 A_1 + s_i B_1 + C_1]]}{[(s_i)^3 4 + (s_i)^2 3 A_2 + (s_i) 2 B_2 + C_2] (-s_i)^2} \quad (6)$$

Таким образом, поставленная задача решена.

Пример расчета:

По полученным соотношениям проведены расчеты при следующих исходных данных:

- длительность 51-кадрового мультикадра составляла 0,235385 с;
- длительность управления уровнем излучаемой мощности БС $t_u = 0,2$ с;
- время приема БС значений параметров УПС, КПС и Д $t_p = 1,5$ с;
- значение вероятностей: $P_1 = P_2 = P_3 = 0,95$.

Правомерность выбранных данных подтверждается соответствием временных параметров реально действующим стандартам.

Результаты моделирования представлены в виде графиков на рис. 2–6.

Указанным исходным данным соответствуют кривые 2 на рис. 2–6. Кривые 1 и 3 (рис. 2) соответствуют значениям t_p , равным 1,0 и 2,0 с соответственно. Значительное увеличение вероятности успешного установления соединения при

уменьшении времени анализа и передачи сигналов УПС, КПС и ДИСТАНЦИИ t_p показывает на целесообразность сокращения времени анализа параметров, передаваемых от ПС к БС, а также длительности передачи данных сигналов. Это может быть достигнуто за счет расширения спектра передаваемых сигналов.

Сравнение кривых 1 и 3 (рис. 3), соответствующих значениям P_1 , равным 0,5 и 0,95, показало, что при увеличении P_1 вероятность успешного установления соединения также несущественно увеличивается. Что обуславливается малой длительностью 51-кадрового мультикадра и высокой вероятностью наличия в любой момент времени доступной подвижному пользователю базовой станции.

На рис. 4 кривые 1 и 3 соответствуют значениям P_2 , равным 0,5 и 0,95 соответственно. Здесь обращает на себя внимание существенная зависимость вероятности успешного установления соединения от значения вероятности успешного приема сигналов УПС, КПС и дистанции (P_2), что подтверждает необходимость увеличения помехозащищенности передаваемых сигналов УПС, КПС и дистанции при неизменной скорости их передачи.

Незначительная зависимость вероятности успешного установления соединения от значений времени и вероятности успешного приема БС сигналов УПС, КПС и дистанции после регулирования мощности (рис. 5, 6) показывают, что при высокой помехоустойчивости этих сигналов вероятность включения алгоритма управления мощностью небольшая. Однако в условиях сильных помех (даже с учетом использования помехоустойчивого кодирования) следует ожидать значения P_1 и P_2 на уровне 0,6–0,7 и, соответственно, увеличение веса времени и вероятности успешного управления мощностью, что определяет одно из направлений борьбы с сильными радиопомехами различной природы.

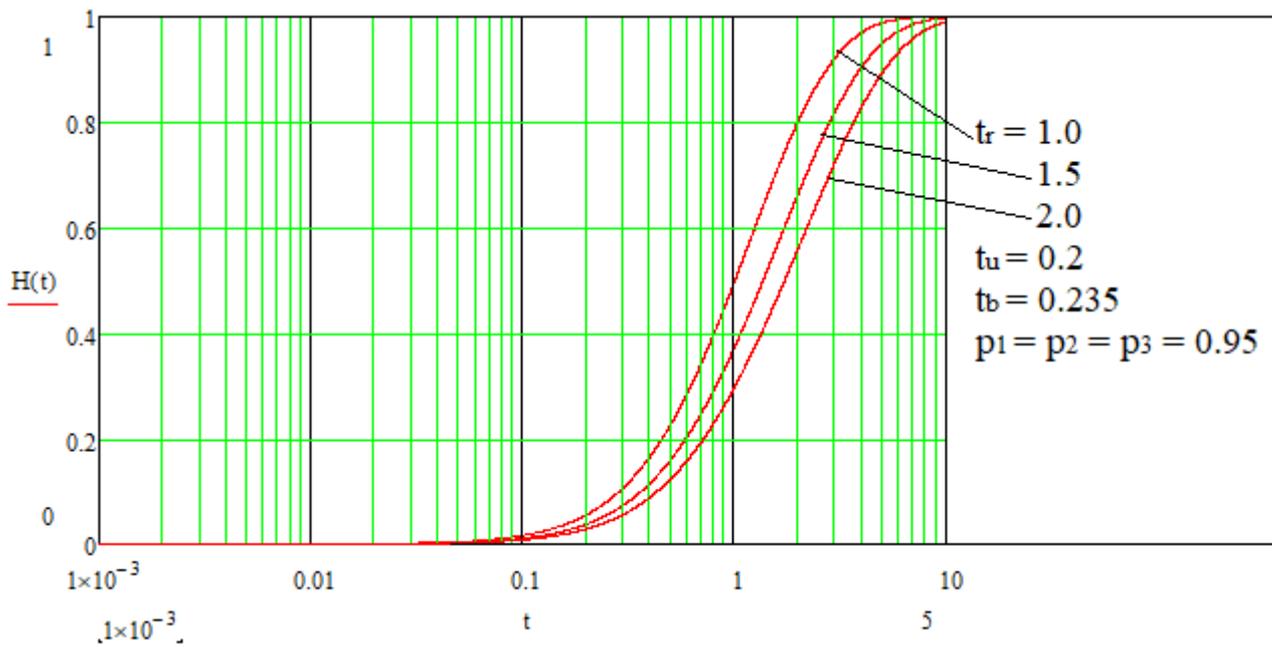


Рис. 2

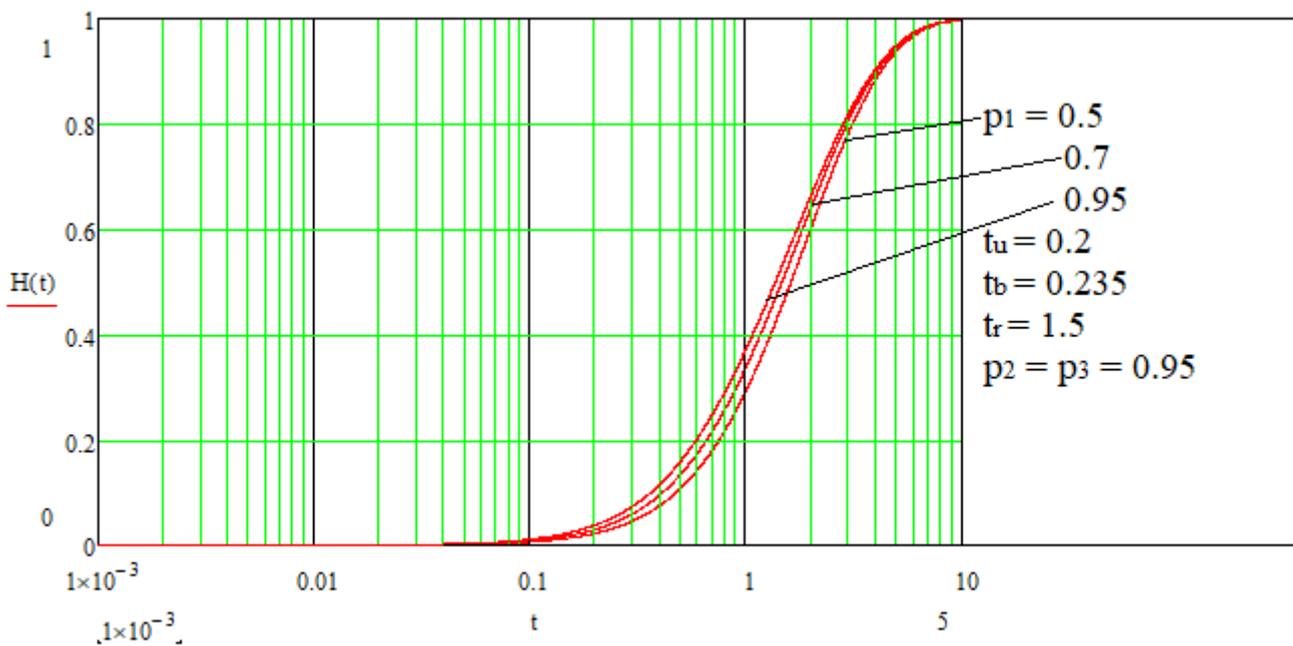


Рис. 3

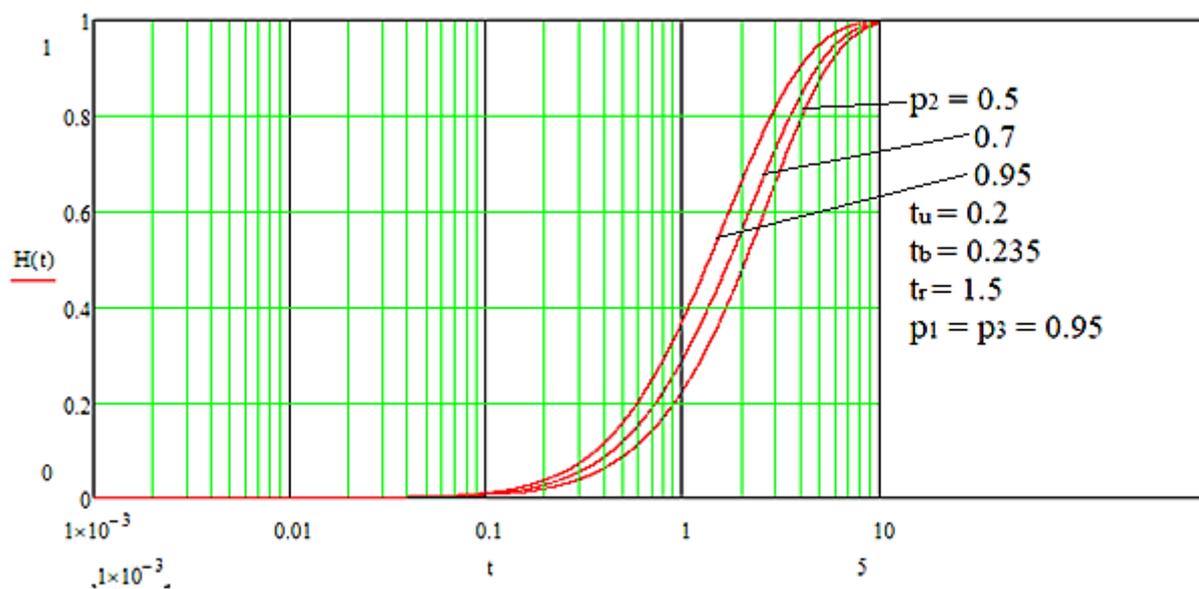


Рис. 4

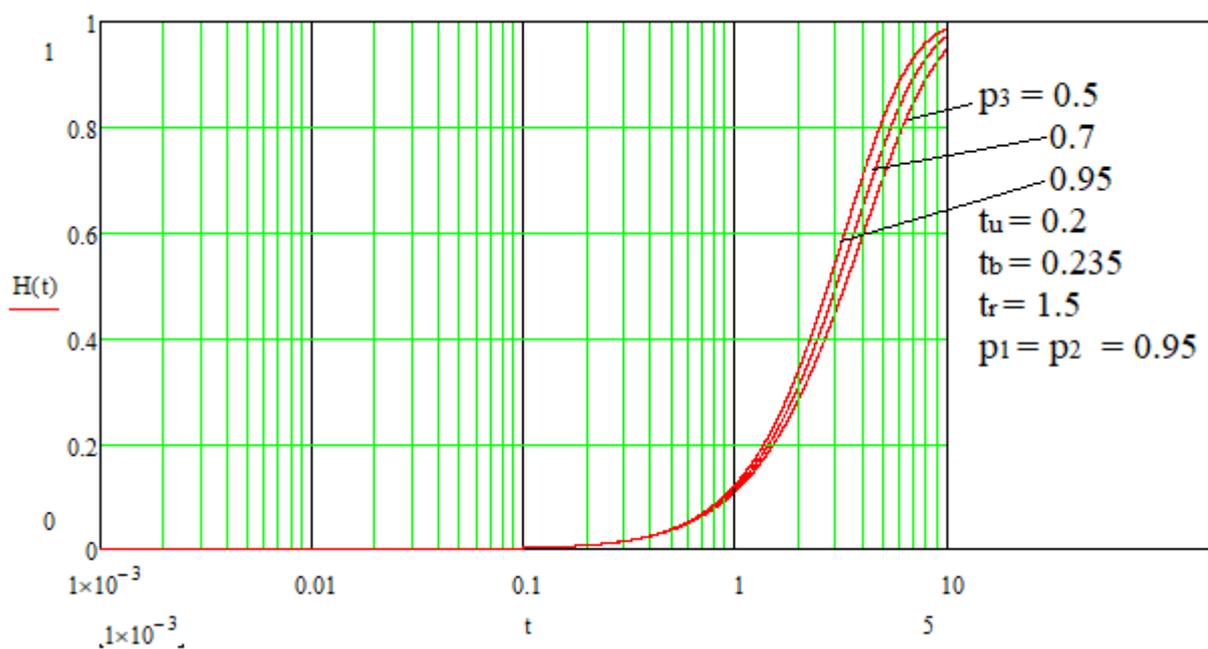


Рис. 5

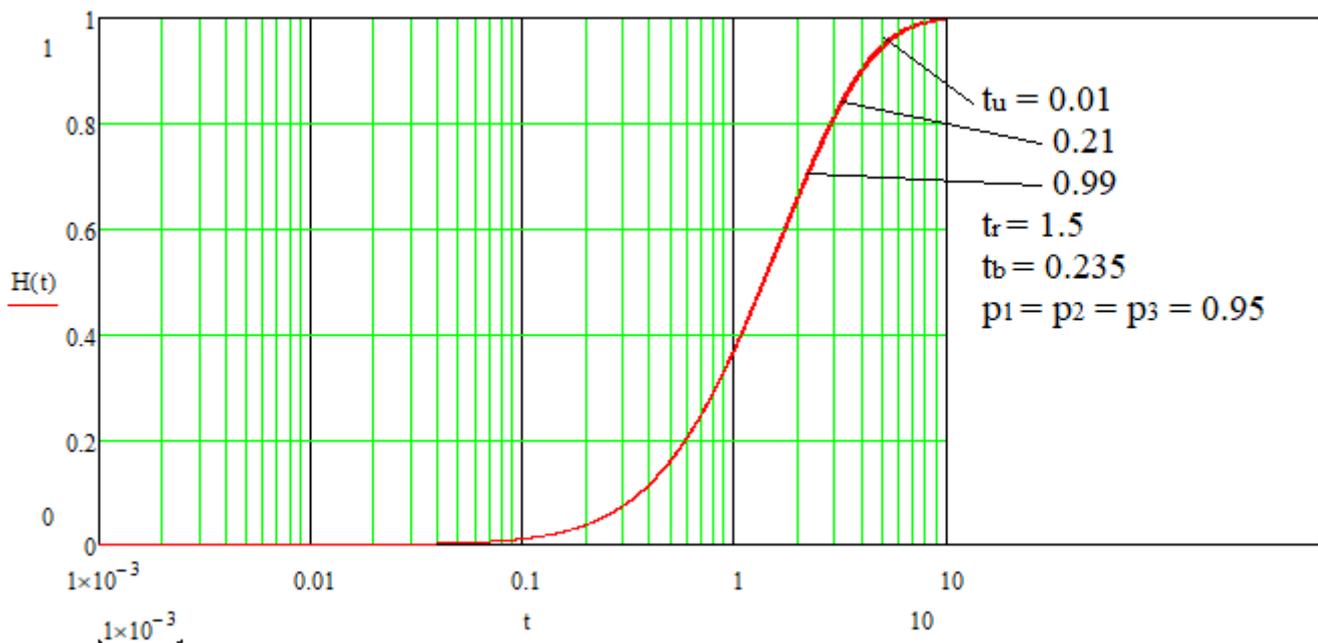


Рис. 6

Выводы

1. Таким образом, разработана математическая модель процесса функционирования совмещенных КУ, обеспечивающих установление и поддержание установленного соединения существующей системы подвижной радиосвязи GSM-R в условиях воздействия помех, а также приведены основные результаты моделирования.

2. Анализ результатов моделирования показал, что модель адекватно отображает взаимосвязь между параметрами КУ и характеристиками условий функционирования системы подвижной радиосвязи, результаты не противоречат логике исследуемых процессов.

3. Следовательно, разработанная модель может быть использована для оценки и анализа эффективности функционирования каналов управления реальных систем подвижной радиосвязи.

Библиографический список

1. Громаков Ю. А. Организация физических и логических каналов в стандарте GSM / Ю. А. Громаков // Электросвязь. — 1993. — № 10. — С. 9–12.

2. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи / Ю. А. Громаков // Мобильные Телесистемы; Эко-Трендз. — М., 1997. — С. 230.

3. Гаврилов А. В. Оценка качества обслуживания в сетях UMTS/GSM / А. В. Гаврилов, А. М. Морозов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. — 2011. — Вып. 11. — С. 276–279.

4. Саенко А. С. Экспериментальное исследование влияния внутрисистемных помех по основному каналу приема на качество связи стандарта GSM-R / А. С. Саенко // Збірник наукових праць ДонІЗТ. — 2008. — № 14.

5. Потапов С. Е. Операторный метод математического моделирования протоколов управления логическим каналом передачи данных / С. Е. Потапов // Известия Института инженерной физики. — 2019. — № 4(54). — С. 65–72.

Дата поступления: 15.09.2022

Решение о публикации: 18.11.2022

Контактная информация:

БОЛДИНОВ Алексей Максимович — аспирант;
23boldinov98@gmail.com

ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич — д-р воен. наук,
проф.; aprivalov@inbox.ru

Mathematical Model for Control Channel of GSM-R Radiocommunication Standard

A. M. Boldinov, A. A. Privalov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Boldinov A. M., Privalov A. A. Mathematical Model for Control Channel of GSM-R Radiocommunication Standard // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 743–751. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-743-751

Summary

Purpose: To develop a model for the evaluation and analysis of control logical channels (CC) performance quality of GSM-R radiocommunication standard. **Methods:** Performance process of shared control channel is presented in the form of a stochastic network with further obtaining equivalent function, average time and the function of distributing the time of information transfer in data transmission channel. **Results:** Mathematical model of shared CC performance process has been developed, corresponding to the algorithm of establishing connection of a mobile user with a network base station. The modeling results allow to conclude on the model adequacy and to assess the degree of various kind interference impact in a given area, including those created by violator's jammers. The feasibility of reducing analysis time of the parameters of signals, transmitted from a mobile to base station, as well as the need to increase the noise immunity of signals for the control of entry into communication, received signal level and quality are shown. **Practical significance:** This model can be used to evaluate and analyze performance efficiency of control channels of GSM-R standard mobile radiocommunication real systems.

Keywords: Radiocommunication, GSM-R, communication channel, control channel, frame, communication standard, model.

References

1. Gromakov Yu. A. Organizatsiya fizicheskikh i logicheskikh kanalov v standarte GSM [Organization of physical and logical channels in the GSM standard]. *Elektrosvyaz'* [Telecommunication]. 1993, I. 10, pp. 9–12. (In Russian)

2. Gromakov Yu. A. Standarty i sistemy podvizhnoy radiosvyazi [Mobile Radio Standards and Systems]. *Mobil'nye Telesistemy; Eko-Trendz* [Mobile TeleSystems; Eco-Trends]. Moscow, 1997, p. 230. (In Russian)

3. Gavrillov A. V., Morozov A. M. Quality of Service Assessment in UMTS/GSM Networks [Quality of Service Assessment in UMTS/GSM Networks]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems]. 2011, I. 11, pp. 276–279. (In Russian)

4. Saenko A. S. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya vnutrisistemnykh pomekh po osnovnomu kanalu priema na

kachestvo svyazi standarta GSM-R [Experimental study of the effect of intrasystem interference on the main reception channel on the quality of GSM-R communication]. *Zbirnik naukovikh prats' DonIZT* [Collection of science practices DonIZT]. 2008, I. 14. (In Russian)

5. Potapov S. E. Operatorny metod matematicheskogo modelirovaniya protokolov upravleniya logicheskimi kanalom peredachi dannykh [Operator's method of mathematical modeling of logical data channel control protocols]. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki* [Proceedings of the Institute of Engineering Physics]. 2019, I. 4(54), pp. 65–72. (In Russian)

Received: September 15, 2022

Accepted: November 18, 2022

Author's information:

Alexey M. BOLDINOV — Postgraduate Student;
23boldinov98@gmail.com

Andrey A. PRIVALOV — Doctor of Military Sciences,
Professor; aprivalov@inbox.ru