УДК 621.396.41

Д.С. Кокин, О.Г. Пономарев

Оценка соотношения между длиной коррелятора и числом абонентов в системе связи с цифровой псевдослучайной модуляцией

Исследуется один из вариантов реализации системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией. У таких систем важным параметром является коэффициент расширения спектра – база сигнала, чем шире база, тем выше помехоустойчивость модулированного сигнала. Данная работа содержит результаты исследования работоспособности, предложенной авторами, системы в условиях многоабонентного использования радиоканала. Численным методом установлена зависимость величины коэффициента расширения – длины коррелятора – от количества абонентов, одновременно работающих в общей полосе частот. Показано, что эта зависимость носит квадратичный характер.

Ключевые слова: цифровая модуляция, сигналы с расширенным спектром, корреляционный прием.
doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-38-43

В данной работе рассматривается один из вариантов реализации системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией [1–4]. Идея расширения спектра, лежащая в основе рассматриваемой системы связи, во многом схожа с той, что используется в системах с прямым расширением спектра (DSSS) [5–9]. Однако если в DSSS системах для расширения спектра используется псевдослучайный меандровый сигнал, то в данной системе с этой целью используются цифровые отсчеты белого шума, генерируемые по алгоритму Мерсена [10]. Таким образом, в качестве расширяющей последовательности используются случайные нормально распределенные δ-коррелированные дискретные отсчеты с нулевым средним и дисперсией σ^2. В передающем тракте последовательность этих отсчетов умножается на модуляционные символы (QPSK) информационного сигнала. Для детектирования передаваемого сообщения в приемном тракте используется корреляционная обработка. Возможность корреляционного приема обеспечивается оригинальной системой фазовой и временной синхронизации [11–13].

Период повторения псевдослучайной последовательности, генерируемой по алгоритму Мерсенна, составляет $2^{19937}-1$ отсчетов. Это предоставляет практически неограниченные возможности по разделению абонентов, использующих не синхронизированные по времени генераторы псевдослучайных чисел (некоторый аналог кодового разделения абонентов). С другой стороны, конечная длина сворачиваемых в корреляционном приемнике цифровых последовательностей, другими словами, конечное число шумоподобных отсчетов, приходящихся на один модуляционный символ информационного сообщения, ограничивает отношение сигнал/шум на выходе коррелятора в приемном тракте и как следствие ограничивает число разделяемых абонентов.

Цель данной работы заключается в том, чтобы определить длину коррелятора, достаточную для детектирования информационного сообщения при одновременной работе в одном и том же радиоканале заданного количества абонентов.

Ниже кратко описаны процедуры генерации и детектирования сигнала с псевдослучайной цифровой модуляцией, приведено описание численного эксперимента по разделению абонентов в рассматриваемой системе связи.

Функциональная схема передающей части системы

На рис. 1 представлена функциональная схема передающей части системы связи с цифровой псевдослучайной модуляцией. Обозначим за t_s и t_n характерные временные интервалы, определяющие скорость изменения состояния системы связи. Интервал времени t_s задает скорость изменения информационных и синхронизирующих бит. Интервал времени t_n определяет скорость изменения псевдослучайных значений на выходах генераторов, блоки *2, 3* и *4*. Интервал времени t_s кратен интервалу времени t_n и на несколько порядков превосходит его. Отношение $T = t_s / t_n$, всегда целое число, задает коэффициент спектрального расширения информационного и синхронизирующего сообщений. С увеличением величины T, с одной стороны, повышается помехоустойчивость модулированного сигнала, с другой стороны, уменьшается скорость передачи сообщений. Частота несущего колебания $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ выбирается заведомо выше частоты дискретизации t_n.

Информационный битовый поток (см. рис. 1) поступает на вход QPSK модулятора (блок *2*). Результатом работы QPSK модулятора являются модулирующие символы $I(t,t_s)$ и $Q(t,t_s)$. Символы $I(t,t_s)$ перемножаются с псевдослучайными отсчетами $\xi(t,t_n)$, генерируемыми в блоке *1*. В результате получается модулированный сигнал $I(t,t_s)\xi(t,t_n)$. Символы $Q(t,t_s)$ перемножаются с псевдослучайны-

ми отсчетами $\eta(t,t_n)$, генерируемыми в блоке *3*. В резуль-тате получается модулированный сигнал $Q(t,t_s)\eta(t,t_n)$. Сигналы $I(t,t_s)\xi(t,t_n)$ и $Q(t,t_s)\eta(t,t_n)$ отвечают за передачу бит информационного сообщения.

В нижней части рис. 1 пунктирной линией выделены блоки, отвечающие за генерацию синхронизирующего сигнала. Биты синхронизирующего сообщения поступают на вход BPSK-модулятора (блок *4*), где отображаются в одну из точек BPSK созвездия. Результатом работы BPSK модулятора являются модулирующие символы $S(t,t_s)$. Символы $S(t,t_s)$ перемножаются с псевдослучайными отсчетами, генерируемыми в блоке *5*. Полученный сигнал $S(t,t_s)\zeta(t,t_n)$ суммируется с сигналом $I(t,t_s)\xi(t,t_n)$.

Суммарный сигнал переносится в область высоких частот путем умножения на синфазную компоненту несущего высокочастотного колебания с частотой ω_0. Псевдослучайные отсчеты $\zeta(t,t_n)$, задержанные на N временных интервалов t_n, суммируются с сигналом $Q(t,t_s)\eta(t,t_n)$. Суммарный сигнал переносится в область высоких частот путем умножения на квадратурную компоненту несущего высокочастотного колебания с частотой ω_0.

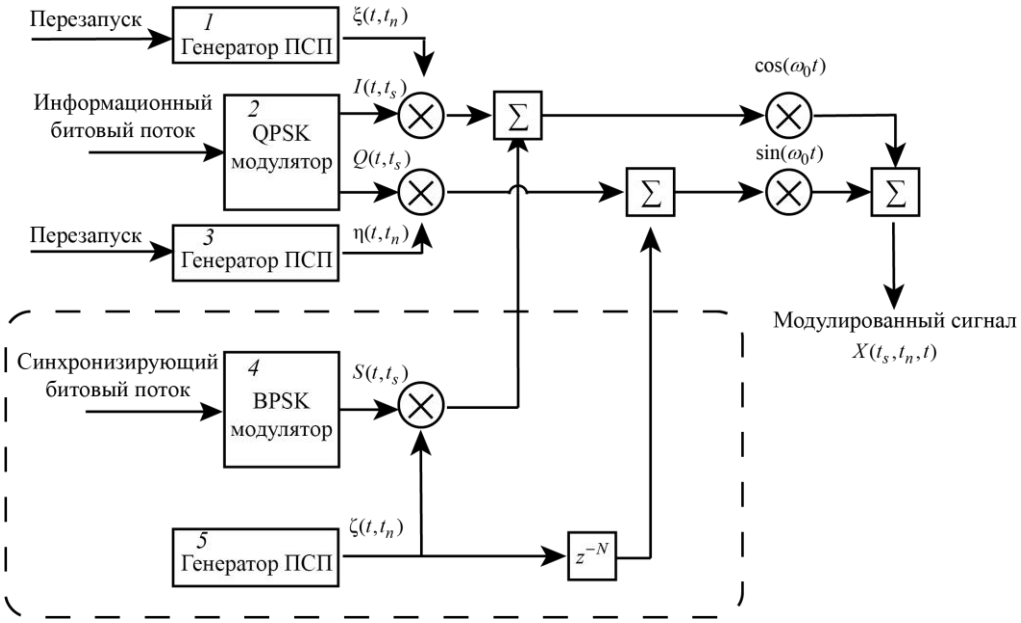

Рис. 1. Функциональная схема передающей части системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией

Передача синхронизирующего сообщения повторяется циклически. В начале каждого цикла производится перезапуск генераторов псевдослучайных последовательностей $\xi(t,t_n)$ и $\eta(t,t_n)$, использующихся для передачи информационного сообщения, блоки *1* и *3* соответственно.

В общем случае модулированный высокочастотный сигнал на выходе передающей части системы имеет следующий вид:

$$X(t,t_s,t_n)=\cos(\omega_0 t)(I(t,t_s)\xi(t,t_n)+S(t,t_s)\zeta(t,t_n))+$$
$$+\sin(\omega_0 t)(\zeta(t-Nt_n,t_n)+Q(t,t_s)\eta(t,t_n)).$$

Функциональная схема приемной части системы

Для детектирования информационных и синхронизирующих бит в приемном устройстве используется корреляционный прием. На рис. 2 представлена упрощенная функциональная схема приемной части системы связи с цифровой псевдослучайной модуляцией. Принимаемый сигнал умножением на синфазную и квадратурную составляющую несущего колебания с частотой ω_0 и фильтрацией фильтрами нижних частот переносится на нулевую частоту. Синфазная компонента фильтрованного сигнала задерживается на N временных интервалов t_n и поступает вместе с квадратурной составляющей на вход коррелятора (блок *3*). Знак сигнала на выходе коррелятора определяется значениями бит синхронизирующего сообщения.

В блоке *4* осуществляется детектирование всех бит синхронизирующего сообщения, после чего происходит перезапуск генератора псевдослучайной последовательности (блок *6*).

В блоке *5* из синфазной и квадратурной компонент фильтрованного сигнала формируется комплексный сигнал, который вместе с комплексными псевдослучайными отсчетами, генерируемыми в блоке *6*, поступает на вход коррелятора, блок *7*. Знаки у вещественной и мнимой частей символов на выходе блока *7* определяются битами информационного сообщения. В блоке *8* происходит преобразование символов QPSK созвездия в информационные биты. Для детектирования сигнала с цифровой псевдослучайной модуляцией приемное устройство должно обладать информацией о начальном состоянии генератора расширяющей последовательности (блок *6*), величине задержки N и величинах временных интервалов t_s, t_n.

Численное моделирование системы связи при одновременной работе нескольких абонентов

На функциональной схеме передающей части системы связи с цифровой псевдослучайной модуляцией (см. рис. 1), показано, что результирующий сигнал является совокупностью по меньшей мере 2 отличных друг от друга шумоподобных сигналов. Если считать, что при формировании сигнала одного абонента в канале связи используется система, представленная на рис. 1, то при одновременной работе в общей полосе частот A абонентов, на входе приемного устройства регистрируется сигнал, являющийся суммой минимум $2A$ некоррелированных между собой шумоподобных сигналов.

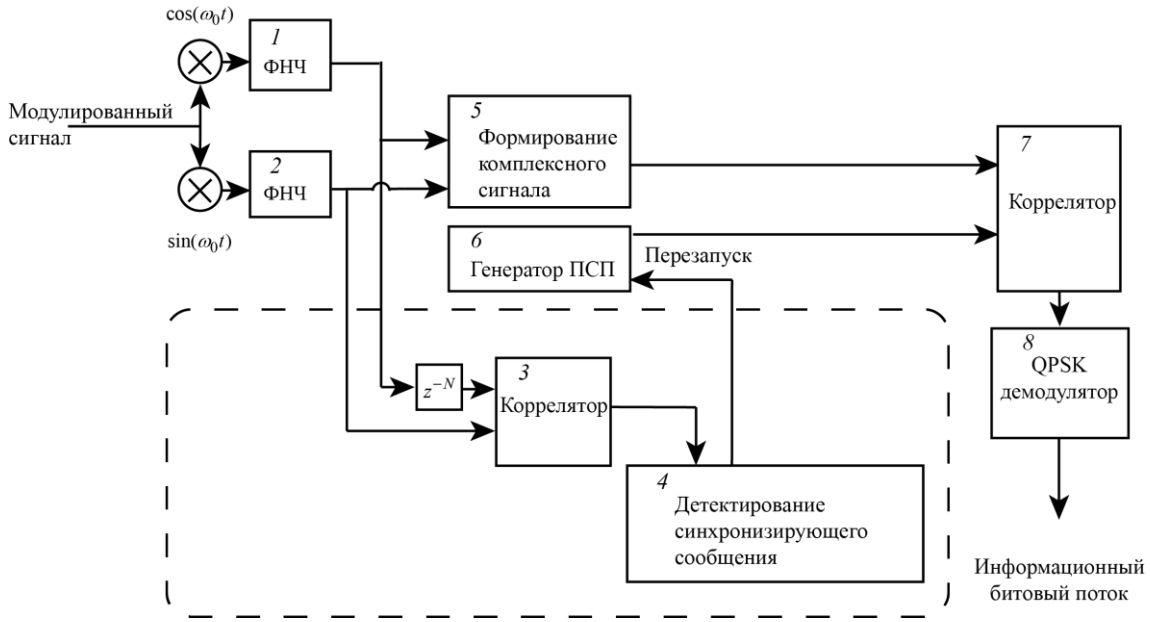

Рис. 2. Функциональная схема приемной части системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией

Оценка количества разделяемых за счет некоррелированности шумоподобных сигналов абонентов системы связи проводилась численным экспериментом. Коррелятором производилось выделение сигнала того или иного абонента. Отношение сигнал/шум на выходах блоков определялось длиной T сворачиваемых в корреляторах цифровых последовательностей. Критерием успешного детектирования сигнала считалось значение отношения сигнал/шум на выходе коррелятора в приемном устройстве выше 3 дБ.

Уровень сигнала определялся квадратом амплитуды центрального пика на выходе коррелятора (рис. 3). Уровень шума рассчитывался как среднее арифметическое между квадратами амплитуд остальных значений.

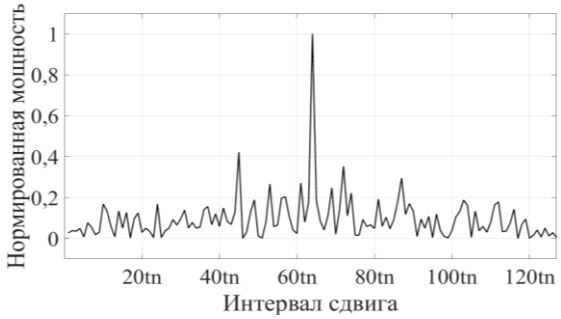

Рис. 3. График мощности на выходе коррелятора. Длина коррелятора T = 64, количество псевдослучайных последовательностей при формировании входных значений равно 2

При оценке считалось, что приемный сигнал синхронизирован по времени и фазе. Воздействие посторонних шумов, кроме шумов формирующих сигналов, отсутствовал. Расчет проводился для одного информационного символа.

Численный эксперимент проводился в среде для научных расчетов MatLab. На рис. 4 представлена схема алгоритма, использующегося для анализа зависимости длины коррелятора от количества псевдослучайных последовательностей, участвующих в формировании результирующего сигнала на входе приемного устройства.

Количество псевдослучайных последовательностей изменялось от $nS_{\text{Min}} = 2$ до $nS_{\text{Max}} = 27$ (см. рис. 4). Начальное значение длины коррелятора $T = 4$. При расчете использовалась выборка из 100 значений. Считалось, что длины коррелятора T достаточно для текущего количества формирующих псевдослучайных последовательностей, если более 90% значений выборки имели отношение сигнал/шум выше 3 дБ. В противном случае значение T увеличивалось на 1. Алгоритм повторялся 5 раз.

На рис. 5 представлена полученная зависимость длины коррелятора T от количества псевдослучайных последовательностей M, участвующих в формировании результирующего сигнала. Точками отмечены значения, полученные в ходе численного моделирования, сплошной линией отмечена кривая $T = 4M^2$.

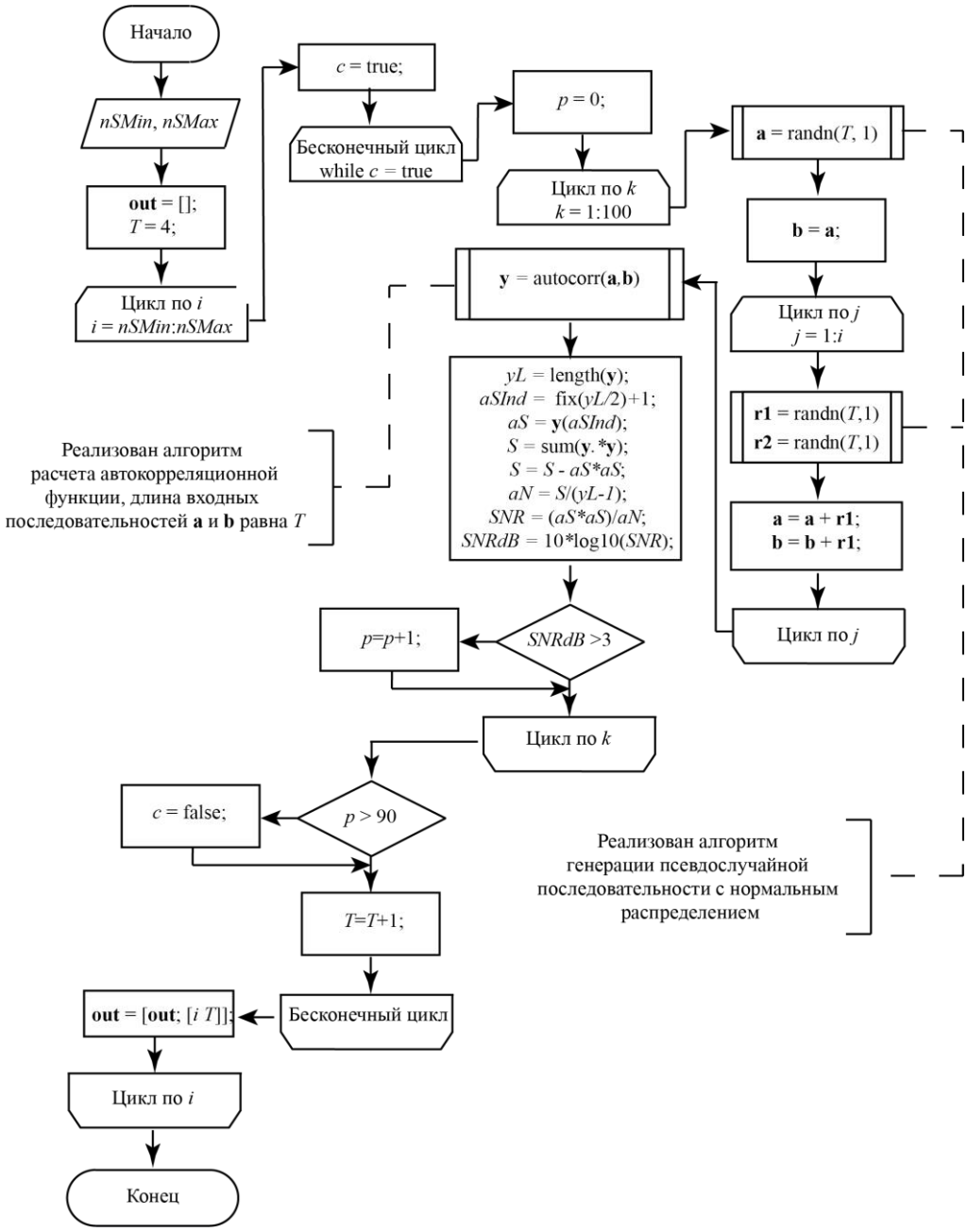

Рис. 4. Схема алгоритма для расчета зависимости длины коррелятора от количества псевдослучайных последовательностей, участвующих в формировании результирующего сигнала

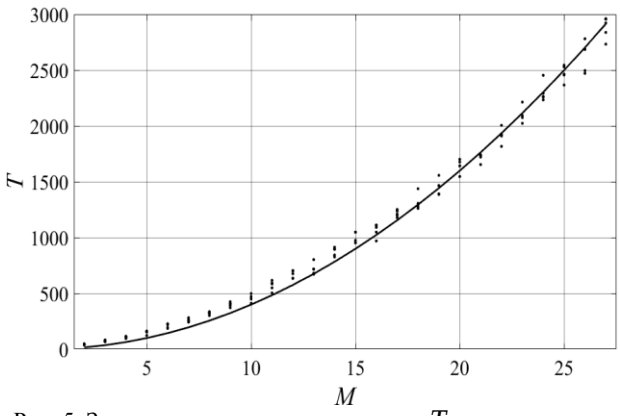

Рис. 5. Зависимость длины коррелятора T от количества псевдослучайных последовательностей M

В системе связи 5G NR максимальная размерность дискретного преобразования Фурье равна 4096 [14–16]. Таким образом, при вычислении операции свертки алгоритмом дискретного преобразования Фурье размерности 4096 рассматриваемая система связи теоретически может обеспечить связь 16 одновременно работающих абонентов.

Выводы

Результаты численного моделирования показали, что значение отношения сигнал/шум на выходе коррелятора выше 3 дБ достигается в том случае, когда длина коррелятора T соотносится с количеством псевдослучайных последовательностей M как $T = 4M^2$. Если считать, что при формировании сигнала одного абонента используются 2 псевдослу-

чайные последовательности, то длина коррелятора T зависит от количества абонентов A как $T = 16A^2$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по Соглашению с Минобрнауки России от 26 ноября 2019 г. № 075-11-2019-031 (проект «Разработка программно-аппаратного комплекса для формирования тестовых сигналов стандарта 5G NR»).

Литература

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

2. Прокис Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.

3. Сверхширокополосная беспроводная связь на основе динамического хаоса / А.С. Дмитриев, А.В. Клецов, А.М. Лактюшкин и др. // Радиотехника и электроника. – 2006. – № 10. – С. 1126–1140.

4. Калинин В.И. Численное моделирование шумовой системы передачи информации с расширением спектра / В.И. Калинин, Д.Е. Радченко, В.А. Черепенин // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – № 10. – С. 1–18.

5. Torrieri D. Principles of Spread-Spectrum Communication Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.studmed.ru/torrieri-d-principles-of-spread-spectrum-communication-systems_a64dd824ecf.html, свободный (дата обращения: 25.09.2021).

6. Polydoros A. Detection Performance Considerations for Direct-Sequence and Time-Hopping LPI Waveforms / A. Polydoros, C.L. Weber // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1985. – Vol. 3. – P. 727–744.

7. Pursley M.B. Spread-Spectrum Multiple-Access Communications // Multi-User Communication Systems. – Vienna: Springer, 1980. – P. 139–199.

8. Macdonald T.G. The performance of direct-sequence spread spectrum with complex processing and quaternary data modulation / T.G. Macdonald, M.B. Pursley // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2000. – Vol. 18. – P. 1408–1417.

9. Viterbi A.J. CDMA Principles of Spread Spectrum Communication / A.J. Viterbi. – MA: Addison-Wesley, 1995. – 245 p.

10. Matsumoto M. Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator / M. Matsumoto, T. Nishimura // ACM Trans. on Modeling and Computer Simulations. – 2017. – Vol. 8. – P. 3–30.

11. Кокин Д.С. Численная модель системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией / Д.С. Кокин, О.Г. Пономарев // Актуальные проблемы радиофизики. Тр. междунар. молодежной научной школы. – Томск: ТНЛ, 2017. – С. 42–47.

12. Кокин Д.С. Временная и фазовая синхронизации в системе связи с псевдослучайной цифровой модуляцией / Д.С. Кокин, О.Г. Пономарев // Актуальные проблемы радиофизики (АПР–2019). VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Томск: Изд. дом ТГУ, 2019. – С. 113–117.

13. Kokin D.S. Time and phase synchronization in communication system with a digital pseudo-random modulation / D.S. Kokin, O.G. Ponomarev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1679. – P. 1–7.

14. 5G; NR; Physical channels and modulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/15.02.00_60/ts_138211v150200p.pdf, свободный (дата обращения: 25.09.2021).

15. SDR Prototype for Clipped and Fast-Convolution Filtered OFDM for 5G New Radio Uplink / S. Gökceli, P.P. Campo, T. Levanen, J. Yli-Kaakinen, M. Turunen, M. Allén, T. Riihonen, A. Palin, M. Renfors, M. Valkama // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 89946–89963.

16. Generalized Fast-Convolution-Based Filtered-OFDM: Techniques and Application to 5G New Radio / J. Yli-Kaakinen, T. Levanen, A. Palin, M. Renfors, M. Valkama // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2020. – Vol. 68. – P. 1213–1228.

Кокин Дмитрий Сергеевич
Аспирант каф. радиофизики
Национального исследовательского
Томского государственного университета (НИ ТГУ)
Ленина пр-т, 36, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-0287-716X
Тел.: +7-923-423-19-73
Эл. почта: 19nikok941@gmail.com

Пономарев Олег Геннадьевич
Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. радиофизики НИ ТГУ
Ленина пр-т, 36, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-9872-9902
Тел.: +7-906-947-76-08
Эл. почта: ponomarev@phys.tsu.ru

Kokin D.S., Ponomarev O.G.

Estimation of the relation between the correlator length and the number of subscribers in a communication system with digital pseudo-random modulation

This article examines one of the options for implementing a communication system with pseudo-random digital modulation. For such systems the spreading factor (the signal base) is an important parameter. This work contains the results of operability study for the system in multi-user radio channel. During numerical simulation it was established how the correlator length depends on the number of users simultaneously working in the common frequency band. It is shown that this dependence has a quadratic character.

Keywords: digital modulation, spread spectrum signals, correlation reception.
doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-38-43

References

1. Varakin L.E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signals]. Moscow, Radio and Communication Publ., 1985. – 384 p. (in Russ.).

2. Proakis J., Salehi M. [Digital communications]. *McGraw-Hill Science,Engineering,Math*, 2000. – 936 p.

3. Dmitriev A.S., Kletsov A.V., Laktyushkin A.M., Panas A.I., Starkov S.O. [Ultrawideband wireless communications based on dynamic chaos]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2006, vol. 51, no. 10, pp. 1126–1140. (in Russ.).

4. Kalinin V.I., Radchenko D.E., Cherepenin V.A. *Chislennoe modelirovanie shumovoj sistemy peredachi informacii s rasshireniem spektra* [Numerical Simulation of a Noise Spread Spectrum Information Transmission System]. Moscow, Journal of Radio Electronics, 2014, no. 10, 18 p.

5. Torrieri D. Principles of Spread-Spectrum Communication Systems. Available at: https://www.studmed.ru/torrieri-d-principles-of-spread-spectrum-communication-systems_a64dd824ecf.html/, free. (Accessed: September 25, 2021).

6. Polydoros A., Weber C.L. Detection Performance Considerations for Direct-Sequence and Time-Hopping LPI Waveforms. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, September 1985, vol. 3, pp. 727–744.

7. Pursley M.B. Spread-Spectrum Multiple-Access Communications. Multi-User Communication Systems. *International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures). Springer, Vienna*, 1980, vol. 265, pp. 139–199.

8. Macdonald T.G., Pursley M.B. The Performance of Direct-Sequence Spread Spectrum with Complex Processing and Quaternary Data Modulation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, August 2000, vol. 18, pp. 1408–1417.

9. Viterbi A.J. CDMA Principles of Spread Spectrum Communication. *Reading, MA: Addison-Wesley*, 1995, 245 p.

10. Matsumoto M., Nishimura T. Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulations*, 2017, vol. 8, pp. 3–30.

11. Kokin D.S., Ponomarev O.G. Chislennaya model sistemy svyazi s psevdosluchajnoj cifrovoj modulyaciej [Numerical model of a communication system with pseudo-random digital modulation]. Tomsk, Publishing house of scientific and technical literature, 2017, pp. 42–47 (in Russ.).

12. Kokin D.S., Ponomarev O.G. Vremennaya i fazovaya sinhronizacii v sisteme svyazi s psevdosluchajnoj cifrovoj modulyaciej [Time and phase synchronization in a communication system with pseudo-random digital modulation]. Tomsk, TSU Publishing House, 2019, pp. 113–117 (in Russ.).

13. Kokin D.S., Ponomarev O.G. Time and phase synchronization in communication system with a digital pseudo-random modulation. *Journal of Physics. Conference series*, 2020, vol. 1679, pp. 1–7.

14. 5G; NR; Physical channels and modulation. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/15.02.00_60/ts_138211v150200p.pdf/, free (Accessed: September 25, 2021).

15. Gökceli S., Campo P.P., Levanen T., Yli-Kaakinen J., Turunen M., Allén M., Riihonen T., Palin A., Renfors M., Valkama M. SDR Prototype for Clipped and Fast-Convolution Filtered OFDM for 5G New Radio Uplink. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 89946–89963.

16. Yli-Kaakinen J., Levanen T., Palin A., Renfors M., Valkama M. Generalized fast-convolution-based filtered-OFDM: Techniques and application to 5G new radio. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, vol. 68, pp. 1213–1228.

Dmitrii S. Kokin
Postgraduate Student, Department of Radiophysics
National Research Tomsk State University (NR TSU)
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-0287-716X
Phone: +7 923 423 19 73
Email: 19nikok941@gmail.com

Oleg G. Ponomarev
Candidate of Science in Physics and Mathematics,
Assistant Professor, Department of Radiophysics NR TSU
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-9872-9902
Phone: +7-906-947-76-08
Email: ponomarev@phys.tsu.ru