

## Способ слепого обнаружения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов на фоне межимпульсной интерференции

© Л.В. Кузьмин<sup>1,2</sup>, А.В. Гриневич<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: lvkuzmin@gmail.com

Поступило в Редакцию 16 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 6 мая 2019 г.

Принято к публикации 6 мая 2019 г.

Решается задача слепого обнаружения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов сверхвысоко-частотного диапазона, прошедших через канал с многолучевым распространением. На основе результатов измерений распространения сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов в реальном беспроводном канале предлагается метод их обнаружения, не подверженный влиянию межимпульсной интерференции.

**Ключевые слова:** сверхширокополосные сигналы, хаотические сигналы, хаотические радиоимпульсы, многолучевое распространение, слепое обнаружение, многолучевое замирание.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.16.48154.17840

Предлагается метод слепого энергетического обнаружения сверхширокополосных (СШП) хаотических радиоимпульсов СВЧ-диапазона, нивелирующий влияние межимпульсной интерференции из-за многолучевого распространения СШП-сигнала [1] в системах беспроводной передачи информации СВЧ-диапазона малого радиуса действия: в жилых и промышленных помещениях, в условиях загородной застройки. Метод является слепым, так как не требует априорных измерений параметров распространения СШП-сигнала в условиях конкретного многолучевого канала.

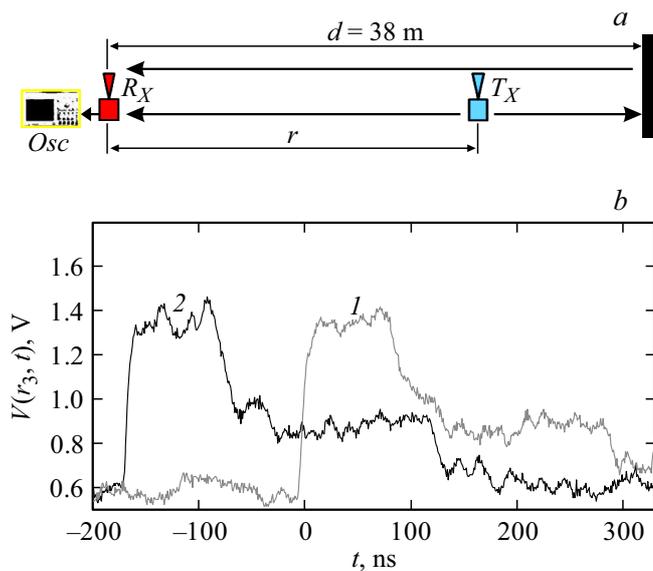
Некогерентное обнаружение хаотических радиоимпульсов не представляет проблемы в многолучевом канале, если задержки в распространении отраженных лучей не превосходят длительности межимпульсных защитных интервалов [2–4]. В этом случае межимпульсной интерференции нет, поэтому характеристики энергетического обнаружения хаотических радиоимпульсов в многолучевом канале по вероятности ошибки близки к характеристикам в канале с одним лучом и гауссовским шумом [2,3].

Проблемы с когерентным и некогерентным обнаружением СШП-сигналов появляются как при использовании хаотических СШП-радиоимпульсов [5,6], так и при использовании ультракоротких СШП-импульсов [7], когда задержки в приходе отраженных лучей непредсказуемо выходят за пределы межимпульсных защитных интервалов, что типично, например, для мобильных беспроводных систем. Для решения этой проблемы предложены и исследованы энергетические методы обнаружения при помощи априорного статистического оценивания параметров многолучевого СШП-канала [5,7], слепые энергетические [8–12] и РАКЕ-методы (см. работы [13,14] и

ссылки в них) для ультракоротких импульсов. В случае сверхширокополосных РАКЕ-приемников рассматривались способы выбора лучей на базе схем PRAKE (partial RAKE), SRAKE (selective RAKE) [13] и их модификации [14]. Было установлено, что теоретические характеристики таких РАКЕ-приемников, как минимум, не превосходят по вероятности ошибок обнаружения характеристик энергетических приемников, но уступают им по простоте реализации. Связано это с большим числом лучей в СШП-канале, которые могут иметь приблизительно одну и ту же мощность [14,15], и прием СШП-сигналов необходимо осуществлять по всем таким лучам.

Здесь предлагается подход к обнаружению последовательности хаотических СШП-радиоимпульсов на фоне межимпульсной интерференции в рамках слепого энергетического обнаружения. Метод опирается на естественное свойство хаотического СШП-сигнала — некогерентное сложение в точке приема всех лучей, попадающих в приемник, что снимает проблему выделения наиболее мощных лучей, характерную для РАКЕ-приемника. Метод анализируется на базе экспериментальных данных по распространению таких импульсов длительностью  $T_p = 83$  ns с периодом их следования  $T = 166$  ns (т.е. импульсы разделены паузами длительности  $T - T_p = 83$  ns) через беспроводный канал.

Предполагается, что мощность помехи от межимпульсной интерференции больше мощности теплового шума приемника, поэтому последним можно пренебречь. Физически это оправдано, так как в противном случае при условии ограниченной чувствительности любого реального приемника он не будет способен обнаруживать многолучевой сигнал на фоне теплового



**Рис. 1.** *a* — схема проведения измерений:  $R_X$  — приемник,  $T_X$  — излучатель,  $Osc$  — запоминающий осциллограф,  $d = 38$  м,  $r$  меняется в диапазоне от 2 до 32 м; *b* — фрагменты экспериментальных реализаций огибающих хаотических радиоимпульсов  $V(r_3, t)$  для  $r_3 = 8$  м, иллюстрирующие межимпульсную интерференцию в приемнике: *1* — огибающая текущего импульса, подлежащего обнаружению, *2* — огибающая предшествующего импульса.

шума [6], и поставленную задачу рассматривать станет бессмысленно.

В ходе эксперимента по схеме, показанной на рис. 1, *a*, межимпульсная интерференция наблюдалась в точке приема  $R_X$  в реальном беспроводном канале, где приемник  $R_X$  был неподвижен, а излучатель  $T_X$  перемещался так, что расстояние между приемником и излучателем составляло  $r_1 = 32$  м,  $r_2 = 16$  м,  $r_3 = 8$  м,  $r_4 = 4$  м и  $r_5 = 2$  м.

Как показано в [6], такая схема измерений создает необходимые для возникновения межимпульсной интерференции условия и позволяет в эксперименте наблюдать два луча: прямой и отраженный от массивной металлической двери, расположенной в торце коридора здания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, где проводился эксперимент [6]. Излучатель  $T_X$  формировал последовательность хаотических радиоимпульсов, приемник  $R_X$  формировал их огибающую. Запоминающий осциллограф фиксировал реализации огибающих с частотой выборки 2.5 GHz. На рис. 1, *b* проиллюстрировано возникновение межимпульсной интерференции на примере двух реализаций огибающих, выбранных из  $N_3 \approx 100$  огибающих импульсов  $V_j(r_3, t)$  ( $j = 1, \dots, N_3$ ), зафиксированных для расстояния  $r_3 = 8$  м между излучателем и приемником в ситуации, когда в приемник последовательно поступило два хаотических радиоимпульса, разделенных межимпульсным интервалом. Межимпульсная интерференция проявляется наложением на позицию

текущего импульса (кривая *1*), подлежащего обнаружению, сигнала огибающей от предшествующего импульса (кривая *2*).

Приемник  $R_X$  состоял из логарифмического детектора [15] и мал шумящего усилителя с коэффициентом усиления  $10^2$ . Приемник в своей рабочей зоне преобразует входную мощность от  $3 \cdot 10^{-9}$  до  $\sim 1$  мВт в выходное напряжение из диапазона от 0.5 до 2 В по логарифмическому закону

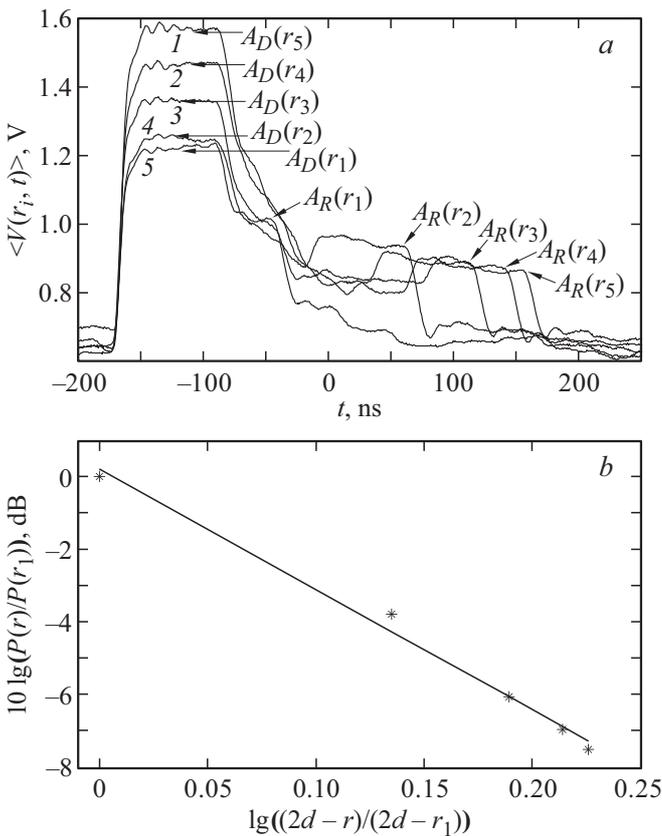
$$V(r, t) = 10\alpha \lg(P(r, t)/P_0), \quad (1)$$

где  $P_0 = 1$  мВт;  $\alpha = 0.021$  В/дБ — крутизна характеристики логарифмического детектора;  $P(r, t)$  — мощность сигнала, поступающая в приемник от излучателя, находящегося на расстоянии  $r$  от него. Благодаря логарифмическому закону преобразования мощности в напряжение амплитуда огибающей сигнала на выходе приемника меняется по линейному закону, в то время как мощность сигнала на входе может меняться на несколько порядков по степенному закону.

При помощи такого приемника в канале с одним лучом реализуется метод обнаружения, который не требует априорного определения порога принятия решения  $H$  о поступлении импульса или об его отсутствии [4]. Пороговое значение мощности  $H$ , превышение которого сигнализирует о поступлении импульса, является фиксированным и определяется суммарной мощностью теплового шума приемника и мощностью помехового сигнала, возникающего из-за погрешностей технической реализации.

Здесь задача создания слепого правила принятия решения о поступлении или отсутствии импульсов на фоне межимпульсной интерференции анализируется в ситуации, когда в приемник поступает сигнал импульс–пауза–отсутствие импульса. В этом случае имеется ненулевая вероятность принять отсутствие импульса после паузы за приход импульса, если пороговое значение мощности  $H$  выбирать так, как это делается в канале с одним лучом. В ситуациях импульс–пауза–импульс, отсутствие импульса–пауза–импульс и отсутствие импульса–пауза–отсутствие импульса ошибочного обнаружения при использовании фиксированного порога  $H$  не происходит.

Для предотвращения ошибочных обнаружений предлагается использовать знание о закономерности затухания многолучевого сигнала, который перед попаданием в приемник проходит больший путь, чем прямой луч, поэтому его мощность, во-первых, заведомо меньше, чем мощность прямого луча, а во-вторых, для этой мощности можно получить оценку сверху, зная периодичность следования импульсов, показатель затухания сигнала в канале и исходя из некогерентного сложения лучей в приемнике благодаря малому времени когерентности хаотического сигнала [6]. Указанные параметры не зависят от условий распространения сигнала в каждом конкретном случае, поэтому предлагаемый метод является слепым.



**Рис. 2.** *a* — усредненные формы огибающей импульсов  $\langle V(r_i, t) \rangle$ , на которых отмечены средние амплитуды  $\langle A_D(r_i) \rangle$  прямого и  $\langle A_R(r_i) \rangle$  отраженных лучей, фиксируемых приемником на расстоянии  $r_i$  (м) от излучателя для импульсов мощностью 100 мВт:  $\langle A_R(r_5=2) \rangle = 0.85$  В (1),  $\langle A_R(r_4=4) \rangle = 0.86$  В (2),  $\langle A_R(r_3=8) \rangle = 0.88$  В (3),  $\langle A_R(r_2=16) \rangle = 0.93$  В (4),  $\langle A_R(r_1=32) \rangle = 1.01$  В (5); *b* — построенная по этим данным зависимость отношения мощностей  $P(r)/P(r_1)$  для отраженного луча (в децибелах) от отношения расстояний  $\lg((2d-r)/(2d-r_1))$  между излучателем и приемником: точки — результаты измерений, сплошная линия — аппроксимация.

В беспроводном канале мощность  $P_R$  сигнала в точке приема пропорциональна  $P_T/r^n$  [1], где  $n = n_0 = 2$  для свободного пространства,  $n = n_1 < 2$  в многолучевом канале, когда имеется прямой луч. В отсутствие прямого луча можно ожидать, что  $n = n_2 > 2$ ; более того,  $n = n_2 \geq 2n_1$ , так как речь идет о переотраженном сигнале.

Здесь показатель затухания переотраженного сигнала был определен экспериментально по аналогии с [6], где был измерен показатель затухания для прямого луча, который оказался равен  $n_1 \approx 1.5$ . Для экспериментального определения значения показателя затухания переотраженных лучей по методике [6] вычислялась усредненная форма огибающей импульсов как

$$\langle V(r_i, t) \rangle = (1/N_i) \sum_{j=1}^{N_i} V_j(r_i, t).$$

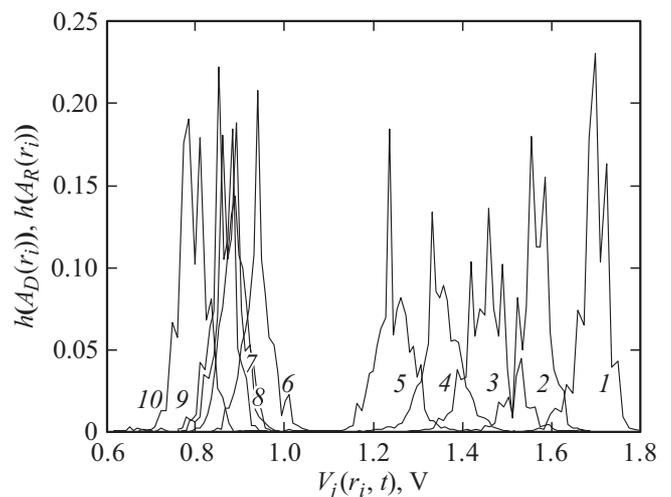
Полученные усредненные формы  $\langle V(r_i, t) \rangle$  для импульсов с излучаемой мощностью 100 мВт для  $r_5 = 2$  м,  $r_4 = 4$  м,  $r_3 = 8$  м,  $r_2 = 16$  м и  $r_1 = 32$  м изображены на рис. 2, *a*. Верхняя кривая 1 на рис. 2, *a* соответствует минимальному расстоянию между излучателем и приемником, нижняя (кривая 5) — максимальному. По усредненным огибающим  $\langle V(r_i, t) \rangle$  были определены средние амплитуды импульсов  $\langle A_R(r_i) \rangle$  отраженного луча. Показатель затухания мощности сигнала с расстоянием для отраженных лучей был рассчитан при помощи (1) через разность между амплитудой импульса для расстояния  $r_i$  и для расстояния  $r_1$ :  $\langle A_R(r_i) \rangle - \langle A_R(r_1) \rangle = 10\alpha \lg(P_R(r_1)/P_R(r_i))$ . Поскольку отношение мощности отраженного луча  $P_R(r_1)$  для расстояния  $r_1$  между излучателем  $T_X$  и приемником  $R_X$  к мощности  $P_R(r_i)$  для расстояния  $r_i$  составляет  $P_R(r_1)/P_R(r_i) = ((2d-r_i)/(2d-r_1))^{n_2}$ , имеем

$$(\langle A(r_i) \rangle - \langle A(r_1) \rangle) / \alpha = 10n_2 \lg((2d-r_i)/(2d-r_1)). \quad (2)$$

По экспериментально измеренной зависимости  $(\langle A(r_i) \rangle - \langle A(r_1) \rangle)$  от  $\lg((2d-r_i)/(2d-r_1))$  был определен показатель затухания  $n_2$  путем определения наклона прямой (2), аппроксимирующей экспериментальные данные (рис. 2, *b*). Показатель затухания оказался равен  $n_2 = 3.3$  для отраженного луча, что согласуется с соотношением  $n_2 \geq 2n_1$ ,  $n_1 \approx 1.5$ .

Опираясь на закономерность падения мощности отраженного луча в зависимости от длины его пробега, можно вычислить пороговое значение мощности  $H$ , выше которого приемником будет обнаруживаться только прямой луч и которого заведомо не превысит отраженный луч, т.е. реализовать слепое обнаружение хаотических радиоимпульсов по прямому лучу.

Расчет порога  $H$  осуществляется на основе периода следования импульсов  $T$  и показателей затухания прямо-



**Рис. 3.** Распределения амплитуд импульсов прямого  $h(A_D(r_i))$  (1 —  $r_1 = 32$  м, 2 —  $r_2 = 16$  м, 3 —  $r_3 = 8$  м, 4 —  $r_4 = 4$  м, 5 —  $r_5 = 2$  м) и отраженного лучей  $h(A_R(r_i))$  (6 —  $r_5 = 2$  м, 7 —  $r_4 = 4$  м, 8 —  $r_3 = 8$  м, 9 —  $r_2 = 16$  м, 10 —  $r_1 = 32$  м).

го  $n_1$  и отраженного  $n_2$  лучей. Так как мощность прямого луча в приемнике составляет

$$P_D = P_T \left( \frac{c}{4\pi f r_D} \right)^{n_1},$$

а отраженного —

$$P_{RT} = \gamma P_T \left( \frac{c}{4\pi f (r_D + cT)} \right)^{n_2}$$

(где  $\gamma$  — отраженная доля мощности,  $f$  — средняя частота сигнала,  $c$  — скорость света,  $r_D$  — длина пути прямого луча,  $cT$  — набег лучей, которые попадут на текущую позицию хаотического радиоимпульса через время  $T$  после предшествующего), из отношения  $P_{RT}/P_D$  можно получить предельное значение мощности  $P_{RT}^*$  для отраженных лучей в приемнике по прошествии времени  $T$  после прихода прямого луча. Для  $n_2 = 2n_1$  имеем

$$P_{RT}^* = \gamma P_D \left( \frac{c}{4\pi f r_D} \right)^{n_1} \left( \frac{1}{1 + cT/r_D} \right)^{2n_1}. \quad (3)$$

Для  $n_1$  в (3) можно принять значение  $n_1 = 1.6$ , что согласуется с другими экспериментальными данными по измерению параметров СШП-каналов [1]. Значение  $\gamma$  можно положить равным  $\gamma = 1$  (полное отражение), а для отношения  $cT/r_D$  считать, что  $cT/r_D \ll 1$  (наихудший случай).

В итоге обнаружение прямого луча на фоне отраженного должно осуществляться с пороговым значением  $H > P_{RT}^*$ . Здесь значение  $P_{RT}^*$  (3) вычисляется на основе усредненных значений амплитуд огибающей хаотических радиоимпульсов по прямому и отраженному лучам. В то же время значения амплитуд огибающей последовательности хаотических радиоимпульсов варьируются от импульса к импульсу, подчиняясь некоторому распределению. Поэтому для предотвращения ошибок, вызванных разбросом в мощности поступающих импульсов, необходимо также учесть ширину этих распределений. На рис. 3 приведены экспериментальные распределения амплитуд огибающих импульсов прямого и отраженного лучей. Распределения ограничены: разброс амплитуд находится в пределах  $\pm 0.1$  В от их средних значений. Это значит, что обнаружение прямого луча на фоне отраженного можно осуществлять с пороговым значением мощности  $H > P_{RT}^* + \Delta P_{RT}$ , где  $\Delta P_{RT} = 0.1/\alpha$ .

В результате появляется физическая возможность устранить влияние межимпульсной интерференции и достигнуть характеристик обнаружения, близких по вероятности ошибки к характеристикам канала с одним прямым лучом, без реализации процедуры выделения отдельных лучей, осуществляемой в RAKE-приемнике.

## Финансирование работы

Работа выполнена по государственному заданию.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта.

## Список литературы

- [1] Molisch A.F. // Proc. of the IEEE. 2009. V. 97. N 2. P. 353–371.
- [2] Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S., Efremova E.V., Khilinsky A.D., Kuzmin L.V. // Int. J. Bifurcation Chaos. 2005. V. 15. N 11. P. 3639–3651.
- [3] Кузьмин Л.В. // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56. № 4. С. 399–416.
- [4] Дмитриев А.С., Рыжов А.И., Попов М.Г. // Радиотехника. Наносистемы. Информационные технологии. 2018. Т. 10. № 2. С. 313–322.
- [5] Кузьмин Л.В., Морозов В.А. // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 3. С. 329–338.
- [6] Кузьмин Л.В., Гриневич А.В., Ушаков М.Д. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. В. 16. С. 48–56.
- [7] Witrissal K., Leus G., Janssen G.J.M., Pausini M., Troesch F., Zasowski T., Romme J. // IEEE Signal Proc. Mag. 2009. V. 26. N 4. P. 48–66.
- [8] Ma H., Wang X., Lu Y., Tian L. // IEEE Int. Conf. on smart grid and smart cities (ICSGSC). Singapore, 2017. P. 308–311.
- [9] Arias-de-Reyna E., Murillo-Fuentes J.J., Boloix-Tortosa R. // IEEE Signal Proc. Lett. 2015. V. 22. N 11. P. 2019–2023.
- [10] Shen B., Yang R., Cui T., Kwak K. // IEEE Int. Conf. on ultra-wideband. Nanjing, 2010. P. 1–4.
- [11] Wu W. // IEEE Int. Conf. on ultra-wideband. Singapore, 2007. P. 556–561.
- [12] Dos Santos A.F., Rave W., Fettweis G. // IEEE Int. Conf. on ultra-wideband. Hannover, 2008. P. 41–44.
- [13] Cassioli D., Win M.Z., Vatalaro F., Molisch A.F. // IEEE Trans. Wireless Commun. 2007. V. 6. N 4. P. 1265–1275.
- [14] Benotmane N.B., Elahmar S.A., Dayoub I., Hamouda W. // IEEE Trans. Vehicular Technol. 2018. V. 67. N 8. P. 7749–7753.
- [15] Analog Devices. Data Sheet 1 MHz to 4 GHz, 80 dB, Logarithmic Detector/Controller; <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5513.pdf>