

**И. Е. Чухломин, Н. А. Файзулин, И. Р. Москович**

Научно-исследовательский институт по измерительной технике – радиотехнические комплексы, Челябинск, Россия

## ОБНАРУЖЕНИЕ КОРОТКОЙ ПАЧКИ ПРИ АДАПТИВНОЙ МЕЖДУПЕРИОДНОЙ ОБРАБОТКЕ

*Проведен сравнительный анализ характеристик обнаружения когерентного и некогерентного сигналов на фоне коррелированной помехи с использованием последетекторных алгоритмов при адаптивной междупериодной обработке.*

**Ключевые слова:** междупериодная обработка, обеляющий фильтр, характеристики обнаружения.

Для цитирования: Чухломин И. Е., Файзулин Н. А., Москович И. Р. Обнаружение короткой пачки при адаптивной междупериодной обработке // Радиопромышленность. – 2016. – № 4. – С. 124–129.

**I. E. Chuhlomin, N. A. Fayzulin, I. R. Moskovich**

Research Institute for the measurement technology – radio systems, Chelyabinsk, Russia

## DETECTION OF A SHORT BLOCK OF SIGNALS IN ADAPTIVE INTERPERIOD PROCESSING

*A comparative analysis of characteristics of detection of coherent and incoherent signal on the background of correlated noise with the use of post-detection algorithms in adaptive interperiod processing has been performed.*

**Keywords:** interperiod processing, whitening filter, detection characteristics.

For citation: Chuhlomin I. E., Fayzulin N. A., Moskovich I. R. Detection of a short block of signals in adaptive interperiod processing. Radiopromyshlennost, 2016, no. 4, pp. 124–129. (In Russian).

DOI 10.21778/2413-9599-2016-4-124-129

### Введение

При воздействии на вход устройства обработки аддитивной смеси сигнала, шума и коррелированной помехи обеляющий фильтр является необходимым элементом междупериодной компенсации коррелированной помехи. Условием «обеления» помехи является равенство матричной импульсной характеристики (МИХ) фильтра «корню» обратной корреляционной матрицы помехи на входе фильтра [1]. При отсутствии априорных данных о помеховой обстановке параметры обеляющего фильтра – МИХ – формируются по обучающей выборке, в результате обработки которой производится оценка корреляционной матрицы  $\Phi$  помехи. Размер пачки  $M$  определяет объем вычислительных операций,

необходимых для оценки  $\Phi$ , ее обращения и формирования предпороговой статистики выходного сигнала. Этот объем резко возрастает при увеличении  $M$  [2]. Одним из способов существенного уменьшения вычислительных операций, кроме минимизации  $M$ , является применение некогерентной (последетекторной) обработки. При этом детектирование может проводиться как до, так и после обеляющего фильтра, что приводит к двум вариантам междупериодной обработки:

1. Когерентный обеляющий фильтр с некогерентным накопителем выходных сигналов.
2. «Некогерентный» обеляющий фильтр с накопителем выходных сигналов.

Известно, что междупериодная обработка существенно влияет на параметры радиолокатора, такие как требования когерентности пачки, пороговые сигналы, стабильность уровня ложных тревог. Поэтому сравнительный анализ характеристик этих вариантов представляет интерес.

В статье используется вероятностный критерий анализа, который сводится к определению вероятности правильного обнаружения  $D$  при фиксированной вероятности ложной тревоги  $F$  и заданных отношениях сигнал/шум, помеха/шум.

Анализ проведен для короткой пачки  $M=(3, 5, 8)$  и значений  $F=(10^{-1}; 10^{-2})$ .

При анализе сравниваются потенциальные возможности алгоритмов, т.е. априори предполагается, что матричная импульсная характеристика обеляющего фильтра равна «корню» обратной корреляционной матрицы входного процесса. Проблемы оценки корреляционной матрицы в данной статье не рассматриваются.

### Основные определения

Входное воздействие аппаратуры междупериодной обработки (МПО) представляет собой  $M$ -мерный вектор – столбец (пачку), состоящий из аддитивной смеси сигнала, помехи и шума

$$U_\gamma = \{U_{\gamma i}\}_{i=1}^M = Y + \gamma X_s, \quad \gamma = 0, 1, \quad (1)$$

где  $Y = \{y_i\}_{i=1}^M$  – вектор аддитивной суммы помехи и шума;  $X_s = \{x_{si}\}_{i=1}^M$  – вектор сигнала.

Векторы  $Y$  и  $X_s$  – взаимно независимые гауссовские комплексные векторы с нулевым средним значением и корреляционными матрицами  $\Phi$  и  $\Phi_s$ :

$$Y \sim CN(0, \Phi), \quad \text{rank} \Phi = M,$$

$$X_s \sim \beta X; \quad \text{rank} \Phi_s = 1,$$

где  $X = \{x_i\}_{i=1}^M$  – вектор ожидаемого сигнала;

$\beta \sim CN(0, \sigma_s^2)$  – случайный параметр.

Вектор смеси (1) имеет нулевое среднее значение и корреляционную матрицу

$$\Phi_u = \begin{cases} \Phi, & \gamma = 0; \\ \Phi + \sigma_s^2 X \cdot X^H, & \gamma = 1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\Phi$  – корреляционная матрица смеси шума и коррелированной помехи;  $X^H$  – эрмитово сопряженная матрица;  $\gamma = 0/1$ , отсутствие/наличие сигнала;  $\Phi = \sigma_n^2 \Phi_N$ ;  $\Phi_N = I_M + \eta \Phi_p$  – нормированная корреляционная матрица смеси шума и помехи;  $I_M$  – единичная матрица, нормированная корреляционная матрица шума;  $\Phi_p$  – нормированная корреляционная матрица помехи;  $\sigma_s^2$  – мощность сигнала;  $\eta = \sigma_p^2 / \sigma_n^2$  – соотношение помеха/шум;  $\sigma_p^2$  – мощность помехи;  $\sigma_n^2$  – мощность шума.

Для когерентного обеляющего фильтра с некогерентным накопителем предпороговая статистика выходного сигнала имеет вид [3]

$$\xi_\gamma = P_\gamma^H P_\gamma, \quad (3)$$

где  $P_\gamma = \{P_{\gamma i}\}_{i=1}^M = H U_\gamma$ ;

$$H^H H = \Psi_u = \Phi_u^{-1}, \quad \text{при } \gamma = 0,$$

то есть производится суммирование квадратов модулей элементов вектора  $P_\gamma$  выходных сигналов обеляющего фильтра, входными сигналами которого является входное воздействие (1).

Для «некогерентного» обеляющего фильтра предпороговая статистика выходного сигнала имеет вид [4]

$$\xi_\gamma = Q_\gamma^T Q_\gamma, \quad (4)$$

где  $Q_\gamma = \{Q_{\gamma i}\}_{i=1}^M = G | U_\gamma |$ ;

$$G^T G = \Psi_{|u|} = \Phi_{|u|}^{-1}, \quad \text{при } \gamma = 0,$$

то есть производится суммирование квадратов элементов вектора  $Q_\gamma$  выходных сигналов обеляющего фильтра, входным сигналом которого является модуль входного воздействия (1).

### Расчет и сравнение характеристик обнаружения

В работе [3] определен закон распределения статистики (3) и получены выражения для  $F$  и  $D$ . При  $\gamma = 0$  получено, что статистика (3) имеет распределение Эрланга и порог  $x_0$ , определяющий  $F$ , и является корнем уравнения

$$F = \varphi(M, x_0), \quad (5)$$

где  $\varphi(M, x) = e^{-x} \sum_{i=1}^{M-1} \frac{x^i}{i!}$ .

Из (5) следует, что при  $\gamma = 0$  пороговый уровень  $x_0$  не зависит от корреляционной матрицы смеси шума и помехи, а зависит только от  $M$ .

Мощность выходного сигнала со статистикой (3) при междупериодной обработке при  $\gamma = 0$ , в соответствии с [5], равна  $W_3 = M \cdot (M + 1)$ .

Зависимость величины порога  $x_0$  и мощности  $W_3$  от размера пачки  $M$  для  $F = 10^{-1}$  и  $F = 10^{-2}$  приведена на рис. 1.

При  $\gamma = 1$  распределение выходного сигнала представляет собой сумму экспоненциального распределения и распределения Эрланга, и величина  $D$  определяется выражением

$$D = b_M^{M-1} \left[ \exp\left\{-\frac{x_0}{\gamma_M}\right\} - \gamma_M^{-1} \sum_{m=0}^{M-2} b_M^{-m} \varphi(m+1, x_0) \right], \quad (6)$$

где  $b_M = 1 + \mu^{-1}$ ;  $\gamma_M = 1 + \mu$ ;  $\mu = M a \xi$ ;  $a = \sigma_s^2 / \sigma_n^2$  – соотношение сигнал/шум;  $\xi = X^* \Psi_u X / M$  – коэффициент использования энергии полезного сигнала.

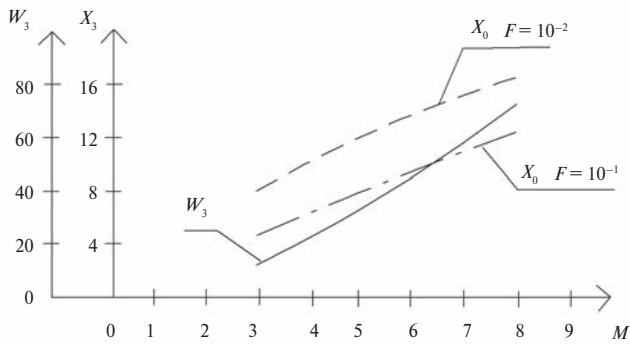


Рисунок 1. Величина порога  $x_0$  и мощность  $W_3$  статистики (3)

Таким образом, на  $D$  существенным образом влияет  $\xi$ . Результаты расчета  $\xi$ , полученные для оптимальной доплеровской частоты сигнала ( $\Omega T = \pi$ ) и экспоненциальной корреляционной функции помехи с коэффициентом корреляции  $\rho_0 = 0,99$ , приведены на рис. 2.

Из полученных графиков видно, что  $\xi$  слабо зависит от  $M$  и определяется главным образом величиной отношения помеха/шум.

Характеристики обнаружения для когерентного обесвечивающего фильтра с некогерентным накопителем (3) приведены на рис. 3.

Анализ полученных зависимостей показывает:

- уменьшение порогового сигнала (при  $D = 0,5$ ) на величину  $\sim 3$  дБ при увеличении  $M$  от 3 до 8 независимо от  $F$  и  $\eta$ ;
- увеличение порогового сигнала на величину  $\sim 8,5$  дБ при увеличении  $\eta$  от 0 до 1000 независимо от  $M$  и  $F$ .

Рассмотрим «некогерентный» обесвечивающий фильтр с накопителем выходных сигналов.

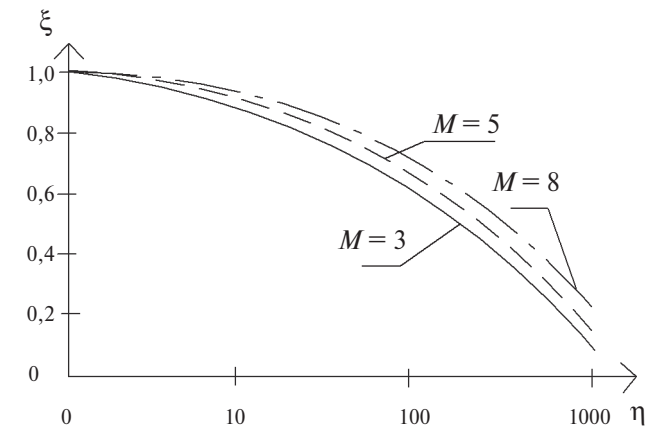
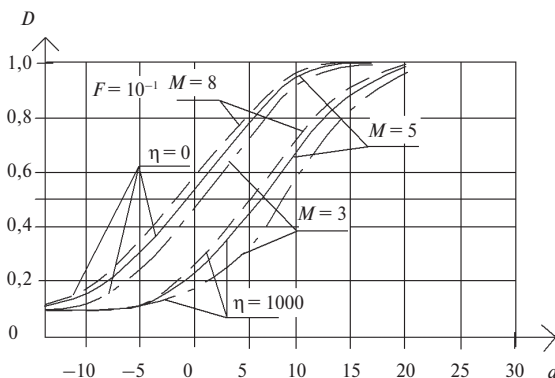


Рисунок 2. Величина коэффициента использования энергии полезного сигнала

Аналитически определить закон распределения выходного сигнала статистики (4) удается только для  $\gamma = 0$ . Он соответствует  $\chi^2$  распределению с единичной дисперсией и порог  $x_0$ , определяющий  $F$ , и находится из уравнения

$$F = \left[ 2^{\frac{M}{2}} \Gamma\left(\frac{M}{2}\right) \right]^{-1} \int_{x_0}^{\infty} t^{\frac{M}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}} dt, \quad (7)$$

где  $\Gamma\left(\frac{M}{2}\right)$  – гамма-функция.

Из (7) следует, что при  $\gamma = 0$  величина порога, как и в предыдущем случае, зависит только от  $M$ . Мощность выходного сигнала со статистикой (4) при междупериодной обработке при  $\gamma = 0$ , в соответствии с [5], равна  $W_4 = M(M+2)$ .

Зависимость величины порога  $x_0$  и мощности  $W_4$  от размера пачки  $M$  для  $F = 10^{-1}$  и  $F = 10^{-2}$  приведена на рис. 4.

В ходе рассмотрения приведенных зависимостей видно, что  $x_0$  и  $W_4$  не зависят от мощности шума и соотношения помеха/шум, при этом мощность выходного сигнала на выходе фильтра со статистикой (4) больше мощности выходного

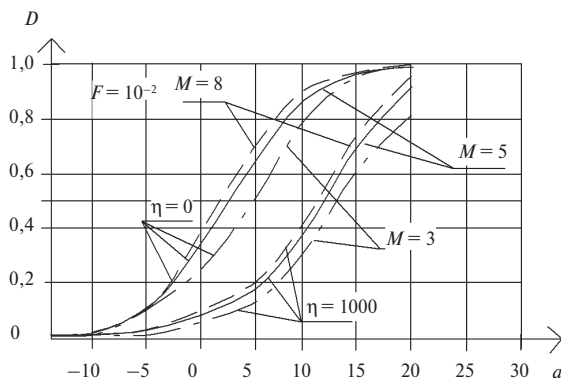


Рисунок 3. Характеристики обнаружителя с когерентным обесвечивающим фильтром и некогерентным накоплением

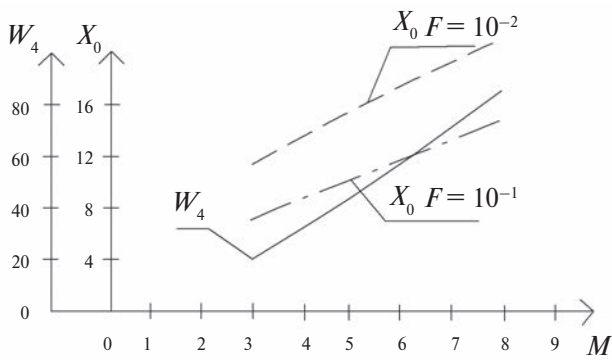


Рисунок 4. Величина порога  $x_0$  и мощности  $W_4$  от размера пачки  $M$  обнаружителя с «некогерентным» обеляющим фильтром и накопителем выходных сигналов

сигнала со статистикой (3), что приводит к увеличению порога  $x_0$  при заданной вероятности ложной тревоги  $F$ .

Для  $\gamma=1$  результаты математического моделирования позволяют сделать вывод о логарифмически нормальном законе распределения с параметрами, зависящими от  $M$ ,  $a$ ,  $\eta$  и  $\Omega T$ . Величина  $D$  находится из выражения

$$D = 1 - \Phi\left(\frac{\ln x_0 - \mu}{\sigma}\right), \quad (8)$$

где  $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ ;  $\mu$ ,  $\sigma$  – параметры логнормального распределения.

Характеристики обнаружения для сигнала, определяемого статистикой (4), приведены на рис. 5.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что в данном алгоритме обработки происходит:

- уменьшение порогового сигнала на ~3 дБ при увеличении  $M$  от 3 до 8 независимо от  $F$  и  $\eta$ ;
- увеличение порогового сигнала на ~8,5 дБ при изменении  $\eta$  от 0 до 1000 независимо от  $M$  и  $F$ ;

- увеличение порогового сигнала на ~6 дБ при  $F=10^{-1}$  и на ~8,5 дБ при  $F=10^{-2}$  относительно статистики (3) при одинаковых величинах  $\eta$  и  $M$ .

Учитывая, что при обработке сигнала, определяемого статистикой (4), используется модуль входного воздействия, целесообразно перейти к модели принимаемого сигнала в виде некогерентной пачки. В этом случае для «некогерентного» обеляющего фильтра и накопителя выходных сигналов

$$\Phi_s = \sigma_s^2 I_M, \text{ rank } \Phi_s = M,$$

$$\Phi_u = \begin{cases} \Phi, & \gamma=0; \\ \Phi + \sigma_s^2 I_M, & \gamma=1. \end{cases} \quad (9)$$

Отметим, что при  $\eta = 0$

$$\Phi_u = \begin{cases} \Phi, & \gamma=0; \\ (1+a)\Phi, & \gamma=1, \end{cases} \quad (10)$$

и, следовательно, при некогерентном сигнале закон распределения статистики (4) соответствует  $\chi^2$  распределению с единичной дисперсией для  $\gamma=0$  и дисперсией  $(1+a)$  для  $\gamma=1$ . Отсюда вероятность ложной тревоги и порог  $x_0$  находятся из (7), а зависимость порога и мощности выходного сигнала со статистикой (4) для некогерентной пачки соответствует рис. 4.

Вероятность обнаружения равна

$$D = \left[ 2^{\frac{M}{2}} \Gamma\left(\frac{M}{2}\right) \right]^{-1} \int_{\frac{x_0}{1+a}}^{\infty} t^{\frac{M}{2}-1} e^{-\frac{t}{1+a}} dt. \quad (11)$$

В работе [6] показано, что при последетекторной обработки и взаимодействии сигнала с помехой ( $\eta > 0$ ) когерентность пачки не имеет значения, так как статистические свойства огибающей отраженного сигнала не зависят от случайной начальной фазы зондирующих сигналов. Характеристики обнаружения для статистики (4) с «некогерентным» обеляющим фильтром и накопителем выходных

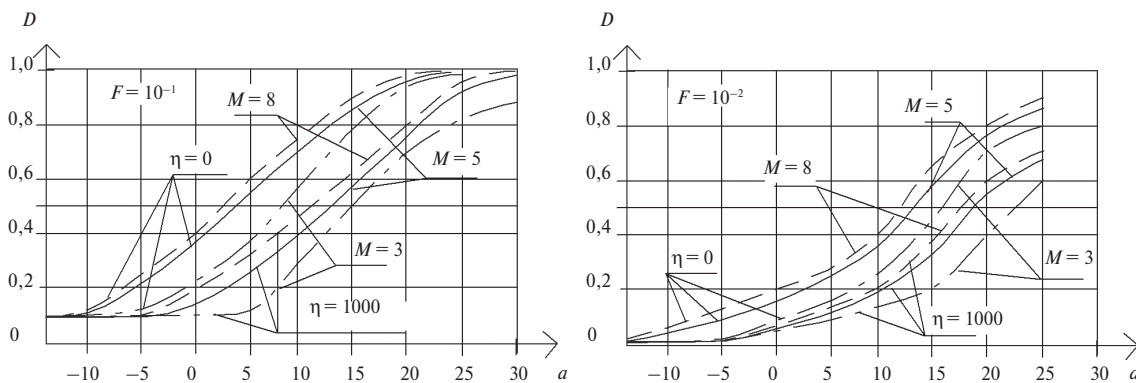


Рисунок 5. Характеристики обнаружения обнаружителя с «некогерентным» обеляющим фильтром и накоплением выходных сигналов (когерентная пачка)

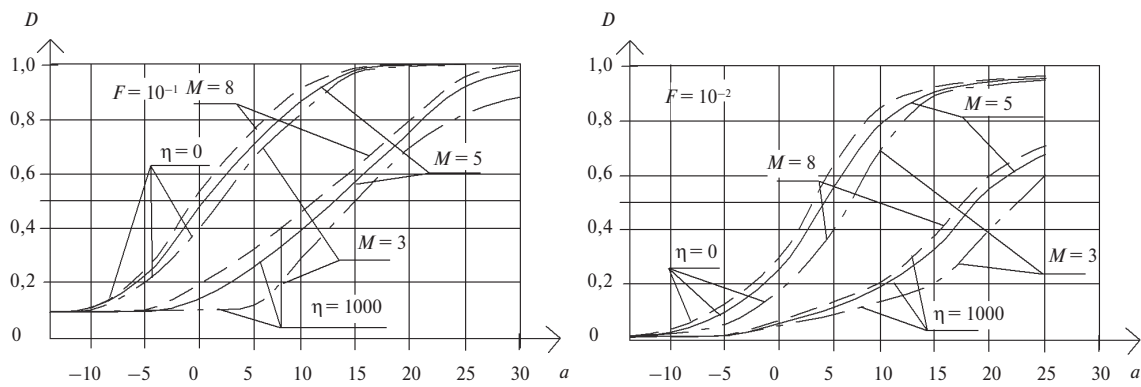


Рисунок 6. Характеристики обнаружения обнаружителя с «некогерентным» обеляющим фильтром и накопителем выходных сигналов при некогерентной пачке

сигналов при некогерентной пачке приведены на рис. 6. Параметры сигнала и помехи соответствуют статистике (3).

Анализ характеристик обнаружения обнаружителя с «некогерентным» обеляющим фильтром и накопителем выходных сигналов при некогерентной пачке показывает, что при данном алгоритме происходит:

- увеличение порогового сигнала на  $\sim 1,5$  дБ независимо от  $M$  и  $F$  по сравнению с обнаружителем с когерентным обеляющим фильтром и некогерентным накоплением (статистика (3)) при отсутствии помехи  $\eta=0$ ;
- уменьшение порогового сигнала на  $\sim 5$  дБ при  $F=10^{-1}$  и на  $\sim 7$  дБ при  $F=10^{-2}$  по сравнению с обнаружителем с «некогерентным» обеляющим фильтром и накоплением выходных сигналов (когерентная пачка) независимо от  $M$  при отсутствии помехи  $\eta=0$ ;
- совпадение характеристик обнаружения обнаружителя с «некогерентным» обеляющим фильтром и накопителем выходных сигналов при

некогерентной пачке и обнаружителя с «некогерентным» обеляющим фильтром и накоплением выходных сигналов (когерентная пачка) при наличии помехи  $\eta \neq 0$ .

### Заключение

Рассмотренные алгоритмы междупериодной обработки короткой пачки обеспечивают обнаружение сигнала в коррелированной помехе.

Вероятность ложной тревоги для обоих алгоритмов определяется размером пачки и не зависит от интенсивности шума и помехи.

Пороговое отношение сигнал/шум определяется размером пачки и интенсивностью помехи. Показано, что потери в пороговом отношении сигнал/шум при использовании междупериодной обработки с «некогерентным» обеляющим фильтром составляют величину  $6\div 8$  дБ при когерентной пачке и интенсивности помехи до 30 дБ. Некогерентность пачки не оказывает существенного влияния на характеристики обнаружения междупериодной обработки с «некогерентным» обеляющим фильтром.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник. М.: Радиотехника, 2007.
2. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981.
3. Lekhovitsky D. I., Flekser P. M., Polishko S. V. On losses of coherent signal in the adaptive detector with noncoherent integration. Proceedings IV International Conference and Antenna Theory and Techniques (September 9–12, 2003, Sevastopol).
4. Леховицкий Д. И., Кирилов И. Г., Бурковский С. И. Особенности МПО сигналов на фоне пассивных помех в некогерентных РЛС // Прикладная радиоэлектроника. 2011. Т. 10. № 4.
5. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
6. Винокуров В. Морская радиолокация. Л.: Судостроение, 1986.

### REFERENCES

1. *Radioelektronnye sistemy: osnovy postroeniya i teoriya* [Radio-electronic systems: basics of design and theory]: spravochnik. M.: Radiotekhnika, 2007. (In Russian).
2. Shirman Ya. D., Manzhos V. N. *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomekh* [Theory and technique of radar data processing on the background of jamming]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1981. (In Russian).

3. Lekhovitsky D.I., Flekser P.M., Polishko S.V. On losses of coherent signal in the adaptive detector with noncoherent integration. *Proceedings IV International Conference and Antenna Theory and Techniques* (September 9–12, 2003, Sevastopol).
4. Lekhovitskiy D.I., Kirilov I.G., Burkovskiy S.I. Specifics of IO signals on the background of passive jamming in incoherent radars. *Prikladnaya radioelektronika*, 2011, Vol. 10, no. 4. (In Russian).
5. Kobzar A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2006. (In Russian).
6. Vinokurov V. *Morskaya radiolokatsiya* [Marine radiolocation]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1986. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Чухломин Иван Евгеньевич**, инженер 1-й категории, Научно-исследовательский институт по измерительной технике – радиотехнические комплексы, 454087, Челябинск, ул. Дарвина, д. 10, тел.: 8 (950) 892-86-57, e-mail: rus-fan@mail.ru.

**Файзулин Наиль Абдуллович**, главный конструктор проекта, Научно-исследовательский институт по измерительной технике – радиотехнические комплексы, 454087, Челябинск, ул. Дарвина, д. 10, тел.: 8 (919) 302-60-76, e-mail: office@niiit-rk.ru.

**Москович Исаак Рахмилович**, главный конструктор проекта, Научно-исследовательский институт по измерительной технике – радиотехнические комплексы, 454087, Челябинск, ул. Дарвина, д. 10, тел.: 8 (351) 903-41-78, e-mail: office@niiit-rk.ru.

## AUTHORS

**Chuhlomin Ivan**, engineer, Research Institute for the measurement technology – radio systems, 10, Darwina st., Chelyabinsk, 454087, tel.: +7 (950) 892-86-57, e-mail: rus-fan@mail.ru.

**Fayzulin Nail**, PhD, chief project engineer, Research Institute for the measurement technology – radio systems, 10, Darwina st., Chelyabinsk, 454087, tel.: +7 (919) 302-60-76, e-mail: office@niiit-rk.ru.

**Moskovich Isaak**, chief project engineer, Research Institute for the measurement technology – radio systems, 10, Darwina st., Chelyabinsk, 454087, tel.: +7 (351) 903-41-78, e-mail: office@niiit-rk.ru.