

УДК 629.7.052

А.П. Кравец, В.Ю. Лебедев, В.И. Тисленко, В.А. Филимонов, В.В. Шаврин

Поиск и обнаружение сигналов спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС в бортовом навигационном комплексе космического потребителя

Исследованы характеристики обнаружения метода последовательного поиска по частоте и параллельного поиска по задержке в блоке поиска и обнаружения сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС) автономной системы навигации космического потребителя при поиске сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) ГЛОНАСС. Путем прямого вероятностного моделирования рассчитаны зависимости плотности распределения вероятности решающей статистики от числа некогерентных накоплений при наличии и отсутствии сигнала в наблюдении на выходе коррелятора. Приведены зависимости вероятности ложной тревоги от величины порога обнаружения и величины порога обнаружения от числа некогерентных накоплений. Получены соотношения, связывающие величину порога с количеством некогерентных накоплений.

Ключевые слова: навигационный сигнал, радионавигационный параметр, вероятность ложной тревоги, время накопления, вероятность правильного обнаружения.

Задача поиска сигналов в приемниках глобальных навигационных спутниковых систем. Основной задачей поиска является обнаружение сигналов НКА и формирование предварительной (грубой) оценки радионавигационных параметров (РНП) сигнала – задержки и доплеровского смещения частоты с точностью, достаточной для осуществления захвата цепями слежения за РНП.

Модель сигнала, принимаемого от i -го НКА, описывается соотношением [1]

$$s_i(t) = A_i \cdot h_{DK}(t - \tau_i) \cdot H_{nm}(t - \tau_i) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot (f_{IF} + f_{d,i}) \cdot t + \phi_i) + n(t), \quad (1)$$

где A_i – амплитуда сигнала i -го НКА; $h_{DK}(t - \tau_i)$ – функция модуляции дальномерным кодом; $H_{nm}(t - \tau_i)$ – функция модуляции навигационным сообщением; f_{IF} и $f_{d,i}$ – промежуточная частота и смещение частоты Доплера, соответствующие i -му НКА; ϕ_i – случайная начальная фаза сигнала; $n(t)$ – белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и двусторонней спектральной плотностью $(N_0/2)$.

Поиск сигнала осуществляется в двумерной области размерами $N_f \times N_\tau$, где N_f и N_τ – количество ячеек поиска по частоте и задержке соответственно, которые определяются исходя из диапазона возможного изменения РНП. Диапазон возможных значений смещения доплеровской частоты зависит от взаимного движения НКА и потребителя. Для наземного потребителя этот диапазон составляет ± 5 кГц [1], для космического потребителя вследствие высокой взаимной динамики – может достигать значений ± 60 кГц [2]. Определение задержки сигнала осуществляется на периоде дальномерного кода. Для сигналов НКА ГЛОНАСС L1 СТ период дальномерного кода составляет $T_c = 1$ мс. Оптимальный алгоритм обнаружения сигнала НКА со случайной начальной фазой и параметрами $\{f_d, \tau\}$ предполагает вычисление модуля корреляционного интеграла с последующим сравнением его величины с порогом H_p .

В качестве оценок РНП сигнала выбирается такая комбинация параметров $\{\tilde{f}_d, \tilde{\tau}\}$, которой соответствует значение решающей статистики $R(i, j)$, превышающее в ячейке (i, j) порог H_p

$$\{i_{\max}, j_{\max}\} = \arg \max_{i, j \in [N_f, N_\tau]} [R(i, j) \geq H_p], \quad \{\hat{f}_d, \hat{\tau}\} = \{\tilde{f}_{d, i_{\max}}, \tilde{\tau}_{j_{\max}}\}, \quad (2)$$

где i, j – номера опорной частоты и задержки.

В соответствии с критерием Неймана–Пирсона [3] величина порога выбирается так, чтобы обеспечить максимально возможное значение вероятности правильного обнаружения P_D при заданном значении вероятности ложной тревоги P_{FA} .

Для повышения вероятности обнаружения сигнала в навигационных приемниках принято увеличивать время накопления сигнала – когерентное T и (или) некогерентное T_{nn} . Однако при этом следует учитывать ограничения, которые накладывают на длительность интервала накопления модуляция сигнала НКА навигационным сообщением (НС) и интервал постоянства РНП. Кроме этого, от времени когерентного накопления сигнала в корреляторе T зависит шаг поиска по частоте $\Delta f_d = 2/3T$, а следовательно, точность оценки и общее время поиска.

Алгоритм поиска и обнаружения сигналов НКА СРНС. Для решения задачи поиска сигналов был рассмотрен вариант аппаратного исполнения блока быстрого поиска, в котором реализуется алгоритм последовательного поиска по частоте и параллельного поиска по задержке. В данном методе вычисление корреляций входного сигнала с репликами кода для всех возможных задержек на периоде кода происходит одновременно, что позволяет существенно ускорить процедуру поиска.

Структурная схема блока поиска представлена на рис. 1.

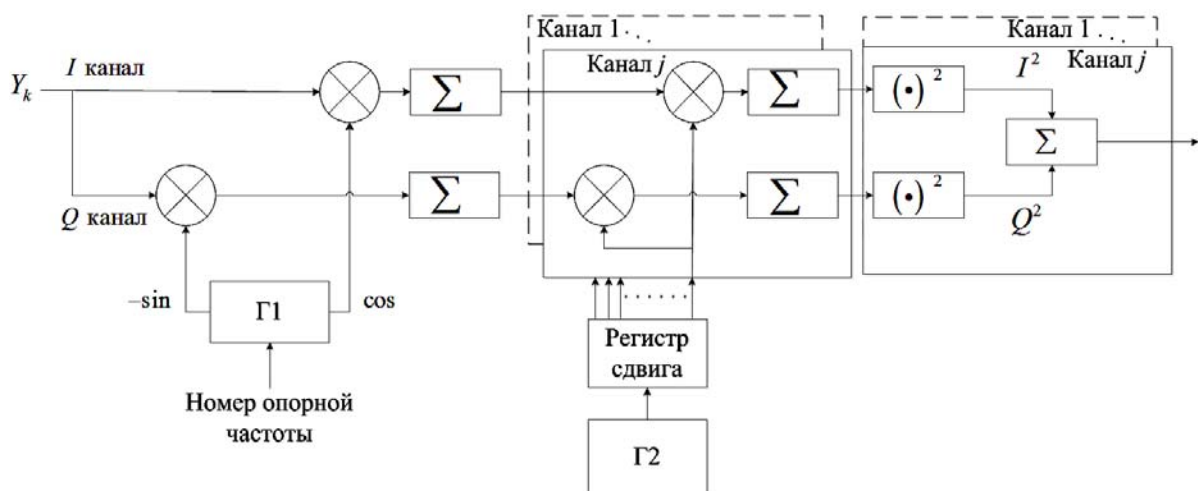


Рис. 1. Блок-схема блока поиска с параллельным поиском по задержке на корреляторах

Алгоритм поиска заключается в следующем.

На вход блока поиска с выхода АЦП поступают отсчеты смеси сигналов и шума Y_k .

1. В локальном генераторе $\Gamma 1$ формируются значения опорного сигнала с частотой $\tilde{f}_{d,i} = f_{d,\min} + (i-1) \cdot \Delta f_d$, где $i=1 \dots N_f$ – номер опорной частоты; N_f – количество позиций поиска по частоте Доплера, которое зависит от области поиска по частоте $N_f = |f_{d,\min} - f_{d,\max}| / \Delta f_d$, где $f_{d,\min}$ и $f_{d,\max}$ – границы области поиска по частоте.

2. Осуществляется перемножение отсчетов входного и опорного сигналов и их предварительное накопление на интервале анализа ячейки по задержке $\Delta \tau$. Результат накопления записывается в буфер и определяется как

$$\begin{aligned}
 I_{S_i}^{(m)} &= \sum_{k=mN_{T_S}+1}^{(m+1) \cdot N_{T_S}} Y_k \cdot \cos(2\pi \cdot (f_{IF} + \tilde{f}_{d,i}) \cdot k \cdot T_S + \tilde{\varphi}_i), \\
 Q_{S_i}^{(m)} &= \sum_{k=mN_{T_S}+1}^{(m+1) \cdot N_{T_S}} Y_k \cdot \sin(2\pi \cdot (f_{IF} + \tilde{f}_{d,i}) \cdot k \cdot T_S + \tilde{\varphi}_i),
 \end{aligned} \quad (3)$$

где N_{T_S} – количество отсчетов на длительности ячейки анализа по задержке, которое определяется как $N_{T_S} = \Delta \tau \cdot f_s$; f_s – частота дискретизации; $T_S = 1/f_s$ – интервал дискретизации; $m=0 \dots N_X - 1$ – номер интервала предварительного накопления; значение N_X соответствует количеству интервалов длительностью $\Delta \tau$ на периоде когерентного накопления T : $N_X = \frac{T}{\Delta \tau}$.

3. При фиксированном значении опорной частоты $\tilde{f}_{d,i}$ для j -го канала поиска по задержке генератором Г2 и регистром сдвига формируется дальномерный код с заданной задержкой $\tilde{\tau}_j = \tau_{\min} + (j-1) \cdot \Delta\tau$, где $j=1 \dots N_\tau$ – номер опорной задержки кода. Шаг поиска по задержке составляет $\Delta\tau = 0,5\tau_{ch}$, где τ_{ch} – длительность элементарного символа дальномерного кода (чипа). Для сигнала ГЛОНАСС L1 СТ $\tau_{ch} \approx 2$ мкс. Количество ячеек поиска по задержке $N_\tau = \lceil \tau_{\max} - \tau_{\min} / \Delta\tau \rceil$, где τ_{\max} и τ_{\min} – границы области поиска по задержке.

4. Для каждой пары (i, j) вычисляются значения корреляционных сумм синфазной и квадратурной компонент, образующих на периоде когерентного накопления матрицы **Ip** и **Qp** с элементами

$$Ip(i, j) = \sum_{m=0}^{N_X-1} Is_i^{(m)} \cdot h_{DK}(m, \tilde{\tau}_j), \quad Qp(i, j) = \sum_{m=0}^{N_X-1} Qs_i^{(m)} \cdot h_{DK}(m, \tilde{\tau}_j) \quad (4)$$

5. Вычисляются матрица **X** значений модуля корреляционного интеграла и матрица **XR** значений некогерентного накопления, элементы которых определены соотношениями

$$X(i, j)^{(c)} = \sqrt{Ip(i, j)^2 + Qp(i, j)^2}, \quad XR(i, j) = \sum_{c=0}^{N_{mn}-1} X(i, j)^{(c)}, \quad (5)$$

где $N_{mn} = T_{mn}/T$ – количество интервалов некогерентных накоплений сигнала.

6. В соответствии с алгоритмом обнаружения принимается решение о наличии, либо отсутствии сигнала.

Пункты 1–6 повторяются для всех пар значений (i, j) .

На выходе блока поиска формируется предварительная оценка РНП сигнала: $\{\hat{f}_d, \hat{\tau}\}$.

Оценки $\{\hat{f}_d, \hat{\tau}\}$ поступают в блок слежения за РНП, где выполняется их уточнение. Точные оценки используются для вычисления координат и составляющих вектора скорости потребителя.

Алгоритм обнаружения. Выполним анализ характеристик обнаружения алгоритма, который представлен в [4]. Преимущество данного алгоритма состоит в том, что вероятность ложной тревоги не зависит от уровня шумов на входе приемника. Она определяется только числом некогерентных накоплений и количеством элементов разрешения по задержке. Формирование решающей статистики выполняется в следующем порядке.

1. При фиксированном значении $\tilde{f}_{d,i}$ согласно (5) вычисляется i -й вектор $\mathbf{XR}^{(i)} = \{XR^{(i)}(j)\}$.

2. Осуществляется поиск локального максимума для заданной i -й частотной позиции и определяется номер ячейки поиска по задержке $j_{\max 1, i}$

$$j_{\max 1, i} = \arg \max_j [XR^{(i)}(j)] \quad (6)$$

3. Из области поиска исключаются N_{exc} максимумов, находящихся в соседних с локальным максимумом ячейках, после чего осуществляется поиск позиции $j_{\max 2, i}$ второго по величине локального максимума

$$j_{\max 2, i} = \arg \max_{j_{\max 2, i} \neq j_{\max 1, i} \pm N_{exc}} [XR(i, j)], \quad (7)$$

4. Вычисляется отношение максимумов, найденных в п. 2 и п.3, и сравнивается с порогом H_p .

Таким образом, решение о наличии сигнала в ячейке поиска принимается при выполнении условия для статистики $R(i, j)$ в виде

$$R(i, j) = \frac{XR^{(i)}(j_{\max 1, i})}{XR^{(i)}(j_{\max 2, i})} \geq H_p,$$

в противном случае принимается решение об отсутствии сигнала. В качестве грубых оценок частоты Доплера \hat{f}_d и задержки кода $\hat{\tau}$ используются значения опорной частоты и задержки, соответ-

вующие номеру ячейки локального максимума, т.е. $\{\hat{f}_d, \hat{\tau}\} = \{\tilde{f}_{d,i}, \tilde{\tau}_{j=j_{\max 1,i}}\}$. Процедура обнаружения выполняется для всех ячеек по частоте.

Моделирование процедуры поиска. Анализ характеристик обнаружения выполнялся путем прямого вероятностного моделирования квадратурных компонент корреляционного интеграла после накопления на интервале T в каждой ячейке. Для простоты обозначений далее индексы ячейки поиска не указаны.

Дискретные последовательности синфазной и квадратурной компонент сигнала на выходе коррелятора определяются выражениями [1]

$$I_k = M[I_k] + I_{f,k}, \quad Q_k = M[Q_k] + Q_{f,k}, \quad (8)$$

где $M[I_k]$, $M[Q_k]$ – постоянные составляющие; $I_{f,k}$, $Q_{f,k}$ – флуктуационные составляющие. Постоянные составляющие определены соотношениями

$$\begin{aligned} M[I_k] &= 2 \cdot C/N_0 \cdot T \cdot H_{nm,k-1} \cdot P(\varepsilon_\tau) \cdot \cos(\phi_{k-1} + \varepsilon_w \cdot T/2) \operatorname{sinc}(\varepsilon_w \cdot T/2), \\ M[Q_k] &= 2 \cdot C/N_0 \cdot T \cdot H_{nm,k-1} \cdot P(\varepsilon_\tau) \cdot \sin(\phi_{k-1} + \varepsilon_w \cdot T/2) \operatorname{sinc}(\varepsilon_w \cdot T/2), \end{aligned} \quad (9)$$

где C/N_0 – отношение мощности сигнала к спектральной плотности шума; $P(\varepsilon_\tau)$ – значение корреляционной функции дальномерного кода; $\varepsilon_\tau = \tau_{k-1} - \tilde{\tau}_{k-1}$ – рассогласование временных задержек входного и опорного сигналов; $\varepsilon_w = 2\pi(f_{d,k-1} - \tilde{f}_{d,k-1})$ – рассогласование по частоте между входным и опорным сигналами. Дисперсии флуктуационных составляющих синфазной и квадратурной компонент равны, их величины $D_{I_f} = D_{Q_f} = 2 \cdot C/N_0 \cdot T$. Отметим, что вследствие временного сдвига опорных дальномерных кодов в соседних (по задержке) ячейках на величину $\Delta\tau = 0,5 \cdot \tau_{ch}$, возникает корреляция одноименных квадратурных компонент [1], равная в нашем случае 0,5.

Результат моделирования процедуры поиска в виде поля значений $XR(i, j)$ для заданного значения параметров представлен на рис. 2, а, б.

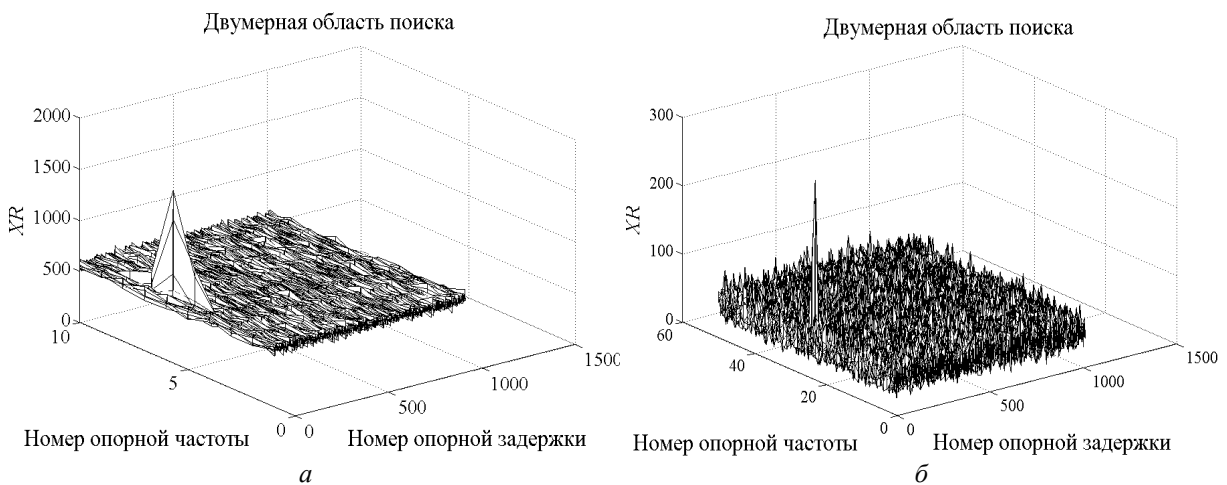


Рис. 2. Двумерное поле значений $XR(i, j)$ на выходе блока поиска при $C/N_0 = 40$ дБ-Гц;

$f_{d,i} = 3,25$ кГц; $\tau_i = 20,25 \cdot \tau_{ch}$; а – $T_{nn} = 100$ мс, $T = 1$ мс; б – $T_{nn} = 20$ мс, $T = 5$ мс

Определение пороговых значений для заданной вероятности ложной тревоги. При отсутствии сигнала, на выходе коррелятора получаем гауссовский дискретный шумовой процесс n_k с нулевым средним значением. Дисперсия этого шума была задана единичной.

Для определения значений порога обнаружения H_p было проведено моделирование обработки сигнала при $N_\tau = 1024$ и различном числе некогерентных накоплений $N_{nn} = 2^s$ при $s = 0, 1 \dots 9$. Число опытов составило $N_p = 10^5$. На рис. 3 а, б показаны расчетные плотности распределения вероятности (ПРВ) статистики $R(i, j)$.

На рис. 4 показаны расчетные зависимости вероятности ложной тревоги от величины порога при различном количестве некогерентных накоплений. На рис. 5 показана зависимость порога обнаружения от количества некогерентных накоплений.

Выполненные исследования позволили получить соотношение для расчета порога обнаружения для заданного числа некогерентных накоплений и требуемой величины P_{FA} . Эмпирическая формула для случая приема сигналов СРНС ГЛОНАСС имеет следующий вид

$$H_P = a \cdot N_{nn}^{-b} + c, \tag{10}$$

где N_{nn} – количество некогерентных накоплений; a, b, c – коэффициенты, учитывающие заданную вероятность ложной тревоги P_{FA} . Значения коэффициентов представлены в таблице.

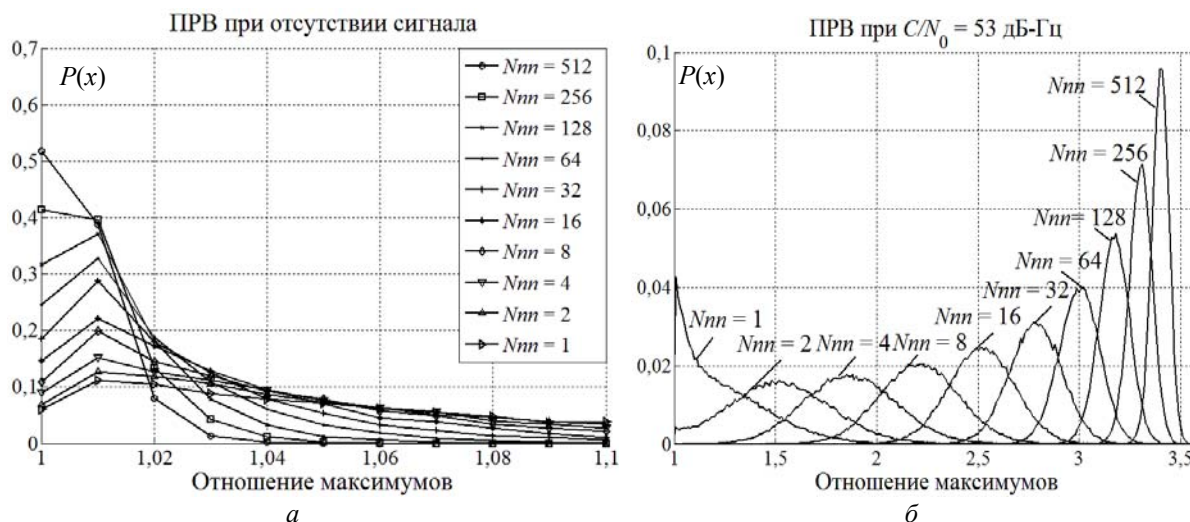


Рис. 3. Плотность распределения вероятности статистики $R(i, j)$ на выходе коррелятора для различного числа некогерентных накоплений: a – при отсутствии сигнала; b – при наличии сигнала, $C/N_0=53$ дБ-Гц

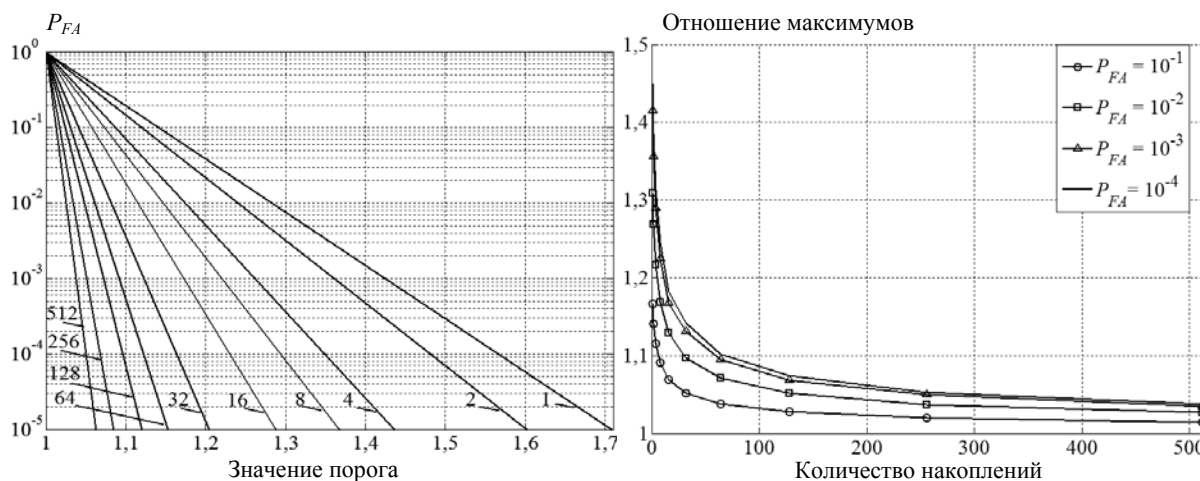


Рис. 4. Зависимость вероятности ложной тревоги от величины порога и числа накоплений

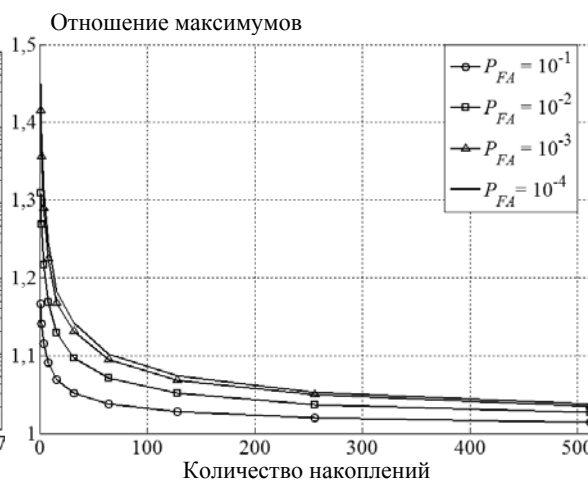


Рис. 5. Зависимость значения порога от числа некогерентных накоплений

Значения коэффициентов для определения порога

Коэффициент	$P_{FA}=10^{-1}$	$P_{FA}=10^{-2}$	$P_{FA}=10^{-3}$	$P_{FA}=10^{-4}$
a	0,2025	0,3676	0,4977	0,5558
b	0,2510	0,3061	0,3132	0,2496
c	0,9700	0,9727	0,9635	0,9141

Характеристики обнаружения. Используя полученные пороговые значения, было проведено моделирование процедуры поиска для определения характеристик обнаружения при различных вероятностях ложной тревоги P_{FA} . На рис. 6 представлены характеристики обнаружения для $P_{FA}=10^{-2}$ и $P_{FA}=10^{-4}$.

Заключение. В работе выполнен расчет характеристик обнаружения для блока поиска и обнаружения сигналов НКА СРНС в системе автономной навигации космического потребителя. Алгоритм обнаружения реализует процедуру последовательного поиска по частоте и параллельного по задержке при поиске сигналов НКА ГЛОНАСС. Путем прямого вероятностного моделирования рассчитаны зависимости плотности распределения вероятности решающей статистики от числа некогерентных накоплений при наличии и отсутствии сигнала в наблюдении на выходе коррелятора. Решающая статистика формируется в виде отношения двух уровней удаленных максимумов модуля корреляционного интеграла, что обеспечивает слабое влияние уровня шума на входе приемника на величину вероятности ложной тревоги.

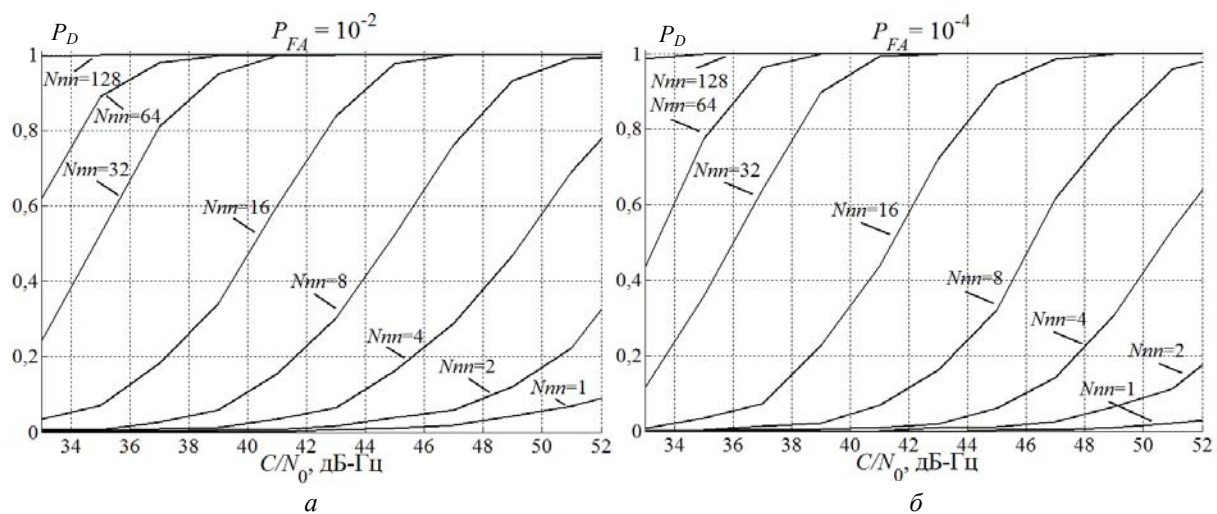


Рис. 6. Характеристики обнаружения для вероятности ложной тревоги: а – $P_{FA}=10^{-2}$; б – $P_{FA}=10^{-4}$

Приведены зависимости вероятности ложной тревоги от величины порога обнаружения и величины порога обнаружения от числа некогерентных накоплений.

Получены соотношения, связывающие величину порога с количеством некогерентных накоплений и требуемым значением вероятности ложной тревоги.

Работа выполнена в рамках проекта ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение № 14.574.21.0101 (уникальный идентификатор RFMEFI57414X0101).

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – 4-е изд., доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
2. Михайлов Н.В. Приемники спутниковой навигации космического базирования / Н.В. Михайлов, В.В. Чистяков. – Воронеж: Научная книга, 2014. – 124 с.
3. Сейдж Э.П. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э.П. Сейдж, Дж. Мелс. – М.: Связь, 1976. – 496 с.
4. Geiger B.C. On the detection probability of parallel code phase search algorithms in GPS receivers / B.C. Geiger, M. Soudan, C. Vogel // Proc. IEEE Int. Sym. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (Istanbul). – Sep. 2010. – P. 864–869.

Кравец Алексей Павлович

Аспирант каф. радиотехнических систем (РТС) ТУСУР, мл. науч. сотрудник НИИ РТС ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-39-49
Эл. почта: kravets.rts@yandex.ru

Лебедев Виталий Юрьевич

Канд. техн. наук, зав. лабораторией НИЛ-РН НИИ РТС ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-39-49
Эл. почта: girs.tusur@mail.ru

Тисленко Владимир Ильич

Д-р техн. наук, профессор каф. РТС ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-39-49
Эл. почта: wolar1491@yandex.ru

Филимонов Владимир Андреевич

Аспирант каф. РТС, мл. науч. сотрудник НИИ РТС ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-39-49
Эл. почта: filimonov90va@gmail.ru

Шаврин Вячеслав Владимирович

Аспирант каф. РТС, мл. науч. сотрудник НИИ РТС ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-39-49
Эл. почта: svv281088@sibmail.com

Kravets A.P., Lebedev V.Yu., Tislenko V.I., Filimonov V.A., Shavrin V.V.

GLONASS navigation satellites signals search and acquisition for space-based navigation receivers

The article describes the method of GLONASS navigation satellites signals search and acquisition for space-based navigation receivers when a prior information about the visible navigation satellites is absent and the Doppler frequency is changed in wide range. The detection probabilities of parallel code phase search method for different false-alarm probability are presented.

Keywords: navigation signal, detection probability, coherent accumulation, non-coherent accumulation, false-alarm probability.