

ВЛИЯНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕДУРЫ БЕСПороГОВОГО ПОИСКА ШУМОПОДОБНОГО СИГНАЛА ПО ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ С ПЕРЕХОДОМ В ЧАСТОТНУЮ ОБЛАСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

© 2022 г. Е. В. Кузьмин^а*, Ф. Г. Зограф^а

^аСибирский федеральный университет,
Свободный просп., 79, Красноярск, 660041 Российская Федерация

*E-mail: ekuzmin@sfu-kras.ru

Поступила в редакцию 10.08.2021 г.

После доработки 15.02.2022 г.

Принята к публикации 22.03.2022 г.

Проведено статистическое исследование эффективности процедуры беспорогового поиска шумоподобного фазоманипулированного сигнала по времени запаздывания при наблюдении на фоне шума и однотональной гармонической помехи при различных вариантах ее частотного положения. Рассмотрено формирование выходного эффекта процедуры поиска за счет перехода в частотную область с использованием дискретного преобразования Фурье. Получены семейства зависимостей вероятности правильного выполнения поиска от безразмерной частотной расстройки при различных отношениях “помеха/сигнал”. Показано существенное варьирование допустимого уровня энергетического превосходства помехи над сигналом, при котором сохраняется значение выбранного показателя качества. Сделаны количественные и качественные выводы о влиянии однотональной гармонической помехи на эффективность процедуры беспорогового поиска.

DOI: 10.31857/S0033849422080101

ВВЕДЕНИЕ

Поиск шумоподобных сигналов (ШПС) по времени запаздывания является начальным этапом функционирования приемной аппаратуры различных радиоэлектронных систем [1–5]. Классический подход к организации процедуры поиска [1, 4, 5], основанный на вычислении взаимных корреляционных функций (ВКФ) входного процесса и опорных сигналов, снижает эффективность при наблюдении ШПС на фоне интенсивных воздействий [4, 6, 7]. Одним из примеров такого воздействия является однотональная гармоническая помеха (ГП), частотное положение которой совпадает с полосой частот ШПС.

В современной литературе широко обсуждаются проблемы помехоустойчивости и помехозащищенности радиоэлектронных систем с ШПС по отношению к действию ГП. Разрабатываются и предлагаются методы обнаружения и оценивания параметров ГП, а также способы борьбы [7–23], анализируется влияние помехи применительно к разным этапам функционирования приемной аппаратуры [24–42], однако подробно не исследуется влияние ГП на показатели качества “незащищенной” процедуры беспорогового поиска. Проведению

исследования такого влияния и посвящена данная работа.

Для оценки степени влияния помехи и эффективности возможных методов борьбы используются различные показатели качества: вероятность правильного обнаружения [12, 17, 23, 26, 31, 34, 36]; вероятность ошибки на бит [8, 20, 24, 34, 39, 42]; энергетические соотношения – “помеха/сигнал”, эффективное отношение “несущая/шум” [12, 16, 23, 25, 29, 32]; ошибка слежения за задержкой [12, 28, 29, 33, 35]; ошибка слежения за фазой или частотой [15, 29, 37, 40, 41]; точность определения местоположения [21, 30] и др. Для иллюстрации конкретных сигнально-помеховых обстановок используются графики спектральных характеристик [8–10, 14, 19, 21] и взаимных функций неопределенности сигналов [12, 19, 23, 31, 36]. В данной работе основным показателем качества является вероятность правильного выполнения поиска сигнала по времени запаздывания, а задаваемые требования к ее значению¹ позволяют определить допустимое отношение “помеха/сигнал”.

¹ Например, 0,9, 0,99.

Цель статьи – статистическое исследование эффективности процедуры беспорогового поиска шумоподобного фазоманипулированного сигнала по времени запаздывания при наблюдении на фоне шума и однотональной гармонической помехи при различных вариантах ее частотного положения и интенсивности.

1. МОДЕЛЬ НАБЛЮДЕНИЙ

Для проведения статистического исследования влияния однотональной гармонической помехи на эффективность процедуры поиска по времени запаздывания выбран ШПС с фазовой манипуляцией (ФМ) [2, 5, 43]:

$$s_{\text{ФМ}}(t) = A_s a(t) \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0),$$

$$a(t) = \sum_{i=0}^{M-1} a_i \text{rect}(t - iT), \quad t \in [0, T_{\text{ПСП}}], \quad (1)$$

где A_s – амплитуда сигнала; $a(t)$ – видеосигнал бинарной псевдослучайной последовательности (ПСП) длины M , образуемой символами $a_i = \{\pm 1\}$; $\text{rect}(t)$ – одиночный прямоугольный импульс единичной амплитуды и длительности $T = 1/f_t$ (f_t – тактовая частота генератора ПСП); $T_{\text{ПСП}} = MT$ – период повторения видеосигнала ПСП; f_0 – центральная частота; φ_0 – начальная фаза. К сигналу (1) аддитивно добавлялись однотональная гармоническая помеха $m(t)$ и шум $n(t)$, таким образом, на входе процедуры поиска наблюдалась аддитивная смесь вида [5, 9, 20, 31, 32, 37, 39, 44]:

$$y(t) = s_{\text{ФМ}}(t) + m(t) + n(t),$$

$$m(t) = A_m \sin(2\pi f_{m0} t + \varphi_{m0}),$$

$$f_{m0} = f_0 \pm \Delta f, \quad (2)$$

где $A_m, f_{m0}, \varphi_{m0}$ – амплитуда, частота и начальная фаза ГП соответственно; Δf – частотная расстройка ГП – вещественная константа, значение которой определяет величину частотного смещения ГП относительно центральной частоты ШПС.

Соотношение интенсивностей сигнала и шума на входе процедуры поиска устанавливалось исходя из необходимого для проведения моделирования значения энергетического потенциала (ЭП) [5]:

$$q_{\text{ЭП}} = \frac{P_s}{N_0} = \frac{A_s^2 f_d}{4\sigma_{\text{ш}}^2}, \quad (3)$$

где $P_s = 0.5A_s^2$ – мощность сигнала (1), $N_0 = \sigma_{\text{ш}}^2 / (0.5f_d)$ – спектральная плотность мощности дискретизированного шума, f_d – частота дискретизации аддитивной смеси (2), $\sigma_{\text{ш}}^2$ – дис-

персия дискретизированного квазизелого шума. Учитывая используемые значения частоты дискретизации смеси и дисперсии дискретизированного шума, на основе (3) вычислялось значение амплитуды сигнала, которое обеспечивало необходимое значение ЭП:

$$A_s = 2\sigma_{\text{ш}} \sqrt{\frac{q_{\text{ЭП}}}{f_d}}. \quad (4)$$

В качестве количественной меры энергетического превосходства гармонической помехи над сигналом использовано отношение “помеха/сигнал” $q_{\text{пс}} = A_m/A_s$, которое устанавливалось варьированием амплитуды ГП относительно рассчитанного значения амплитуды сигнала (4).

2. ПРОЦЕДУРА ПОИСКА СИГНАЛА И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПРАВИЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ПОИСКА

Поиск сигнала $s_{\text{ФМ}}(t - \tau_s)$ по времени запаздывания τ_s (по задержке) реализуется в виде оптимальной процедуры распознавания сигналов, максимизирующей вероятность правильного решения [1]. Данная процедура предполагает проверку гипотез о временном положении сигнала за счет вычисления взаимных корреляционных функций смеси (2) и опорных сигналов, с последующим выбором максимального значения ВКФ и определением его временного положения и, таким образом, принятием решения об оценке задержки сигнала $\hat{\tau}_s$ [1]. Для получения ВКФ удобно применить подход [45], основанный на вычислении дискретного преобразования Фурье (ДПФ) смеси (2) и несмещенного опорного сигнала, вычисления поэлементного произведения полученных комплексных спектров и вычисления обратного ДПФ от поэлементного произведения спектров. С учетом вида модуляции полезного сигнала (1), величина Z , пропорциональная огибающей ВКФ аддитивной смеси (2) и опорного сигнала, формулируется следующим образом [46]:

$$Z = \left| \mathcal{F}^{-1} \left[\mathcal{F}(\dot{\mathbf{Y}}) \cdot \overline{\mathcal{F}(\mathbf{A}_{\text{оп}})} \right] \right|, \quad \mathbf{A}_{\text{оп}}(kT_d) = a(kT_d),$$

$$\dot{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y}_i + j\mathbf{Y}_q = y(kT_d) \cos(2\pi f_0 kT_d) +$$

$$+ jy(kT_d) \sin(2\pi f_0 kT_d),$$

$$k = 1, 2, \dots, Kf_d T_{\text{ПСП}}, \quad K = 1, 2, \dots, \quad (5)$$

где $\mathcal{F}(\bullet)$ и $\mathcal{F}^{-1}(\bullet)$ – операторы прямого и обратного ДПФ соответственно; $\dot{\mathbf{Y}}$ – комплекснозначный вектор, содержащий $Kf_d T_{\text{ПСП}}$ отсчетов аддитивной смеси (2); $\mathbf{A}_{\text{оп}}$ – отсчеты опорной несмещенной ПСП; k – номер отсчета; $T_d = 1/f_d$ – интервал дискретизации; черта сверху означает комплексное сопряжение; смысл остальных обозначений

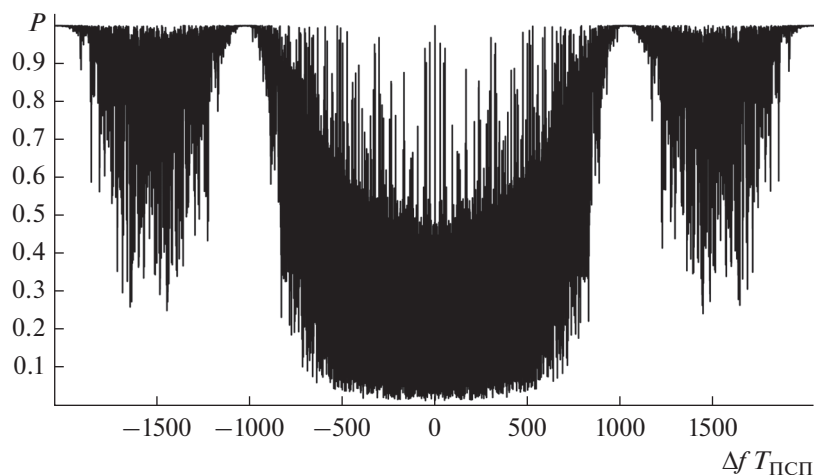


Рис. 1. Зависимость вероятности правильного выполнения поиска от безразмерной частотной расстройки ГП $P(\Delta f T_{\text{ПСП}})$ при $K = 1$; $q_{\text{пс}} = 35$ дБ.

понятен без пояснений. Временное положение максимума величины Z позволяет получить искомую оценку задержки сигнала $\hat{\tau}_s$. Центральная частота сигнала полагается известной².

В качестве количественной характеристики эффективности процедуры поиска ШПС по времени запаздывания при наблюдении на фоне ГП и шума в работе используется вероятность правильного выполнения поиска P [1], которая оценивалась следующим образом [7].

1. Задавалось значение частотной расстройки Δf однотоновой гармонической помехи.

2. Устанавливалось отношение “помеха/сигнал” $q_{\text{пс}}$.

3. Формировалась аддитивная смесь (2), причем время запаздывания формируемого ШПС (1) и фаза ГП устанавливались случайными равномерно распределенными величинами на интервалах $\tau_s \in [0, T_{\text{ПСП}})$ и $\varphi_{m0} \in [0, 2\pi)$ соответственно.

4. Вычислялся выходной эффект Z (5) и определялась оценка $\hat{\tau}_s$ времени запаздывания ШПС на основе выявляемого значения координаты абсциссы, соответствующей максимуму Z .

5. Принималось решение о правильности или неправильности выполненного поиска временного положения ШПС в соответствии с выбранным критерием правильности – “попаданием” оценки $\hat{\tau}_s$ (п. 4) в границы временного интервала, равного длительности чипа ПСП T , относительно установленного (п. 3) временного положения ШПС τ_s .

² При неизвестности центральной частоты ШПС процедура (5) может быть выполнена последовательно или параллельно для проверки необходимого количества частотных гипотез (поиск по частоте).

6. Вычислительный эксперимент по п. 3–5 повторялся N раз для каждого из устанавливаемых отношений “помеха/сигнал” (п. 2).

7. Для каждого из установленных отношений “помеха/сигнал” вероятность правильного выполнения поиска P оценивалась как отношение количества успешных испытаний (поиск ШПС выполнен правильно) к общему количеству испытаний.

8. Изменение условий п. 1 обеспечивало получение семейства зависимостей P от отношения “помеха/сигнал” $q_{\text{пс}}$ для различных частотных расстроек Δf .

9. По полученным зависимостям $P(q_{\text{пс}})$ оценивались значения отношений $Q_{\text{пс}}$, при которых обеспечивалась вероятность $P = \text{const}$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 1 представлена зависимость вероятности правильного выполнения поиска P от величины безразмерной частотной расстройки ГП $\Delta f T_{\text{ПСП}}$ для фиксированного значения отношения “помеха/сигнал”, равного $q_{\text{пс}} = 35$ дБ. На рис. 2, 3 представлены фрагменты зависимостей, аналогичных показанной на рис. 1, для $q_{\text{пс}} = 15, 20, 30$ дБ и более узких интервалов частот. На рис. 4 представлены результаты проведенного моделирования в виде зависимости $Q_{\text{пс}}(\Delta f T_{\text{ПСП}})$, иллюстрирующей допустимые условия $Q_{\text{пс}}$ наблюдения сигнала, при которых сохраняется эффективность процедуры поиска, характеризуемая вероятностью $P = 0.99$. На рис. 5–10 представлены фрагменты зависимости $Q_{\text{пс}}(\Delta f T_{\text{ПСП}})$, соответствующие частотному

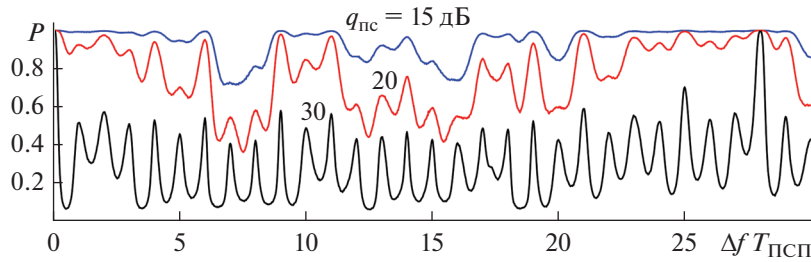


Рис. 2. Фрагмент зависимости $P(\Delta f T_{\text{ПСП}})$ при $K = 1$, $\Delta f T_{\text{ПСП}} \in [0, 30]$.

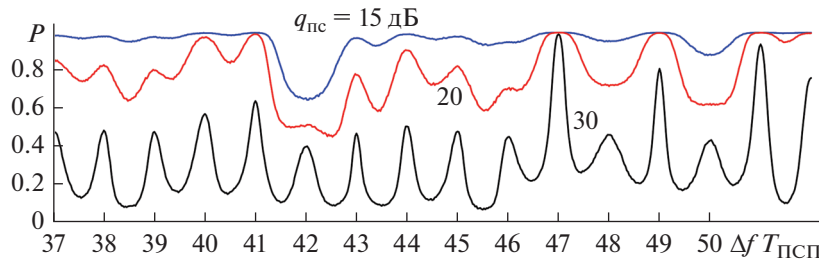


Рис. 3. Фрагмент зависимости $P(\Delta f T_{\text{ПСП}})$ при $K = 1$, $\Delta f T_{\text{ПСП}} \in [37, 53]$.

положению ГП в области главного лепестка спектра ШПС-ФМ. Рис. 1–5 получены при длительности временного интервала корреляционной обработки, равного одному периоду ПСП – случай однократного накопления в корреляторе ($K = 1$). Рисунки 6–10 демонстрируют поведение зависимостей $Q_{\text{пс}}(\Delta f T_{\text{ПСП}})$ при так называемом когерентном накоплении (когерентном интегрировании), что означает K -кратное увеличение длительности непрерывной корреляционной обработки ($K > 1$). На рис. 6–8 представлены случаи выполнения двух, четырех и восьми накоплений соответственно, а на рис. 9 и 10 – фрагменты семейства характеристик, полученные при $K = 1, 2, 4, 8$ (рис. 9) и $K = 1, 3, 5, 7$ (рис. 10). Представленные зависимости получены по описанной выше методике с использованием выражений (1)–(5). Условия моделирования были следующими: фиксированное значение энергетического потенциала $\tilde{q}_{\text{ЭП}} = 10 \lg(q_{\text{ЭП}}) = 45$ дБГц; отношение $f_{\text{д}}/f_0 = 4$; длина ПСП $M = 1023$ (PRN 1 [47] сигнала GPS C/A $L1$); $f_0 = 2.048$ МГц; количество статистических испытаний $N = 10^5$. Всего при проведении исследований получено 10^2 зависимостей, аналогичных показанной на рис. 1, в диапазоне отношений “помеха/сигнал” от 0 до 100 дБ с шагом 1 дБ.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное статистическое исследование позволяет сделать определенные выводы общего и частного характера. Вероятность P правильного выполнения поиска ШПС по времени запаздывания сложным образом зависит от частотной расстройки ГП Δf (см. рис. 1–3). Зависимость $P(\Delta f)$ имеет лепестковую структуру. При проведении исследований установлено, что боковые лепестки данной зависимости могут быть как визуально незаметными, так и отчетливо различимыми, что проявляется при повышении отношения “помеха/сигнал” $q_{\text{пс}}$. Начальный участок зависимости $P(\Delta f)$, показанный на рис. 2, характеризуется сравнительно быстрым спадом, крутизна которого заметно возрастает при увеличении интенсивности ГП.

Зависимость $Q_{\text{пс}}(\Delta f)$ также имеет лепестковую структуру (см. рис. 4), ожидаемо напоминающую “перевернутый” спектр ШПС. При снижении требований к качеству поиска ($P = 0.9$) допустимый уровень отношения $q_{\text{пс}}$ возрастает (см. рис. 5). Неравномерность значений зависимости $Q_{\text{пс}}(\Delta f)$ несколько выше в области боковых лепестков по сравнению с основным лепестком. Ширина лепестков у зависимостей $P(\Delta f)$, $Q_{\text{пс}}(\Delta f)$ и периодичность их повторения определяются тактовой частотой генератора ПСП.

Случаи воздействия ГП на частотах, близких к центральной частоте ШПС-ФМ для принятых

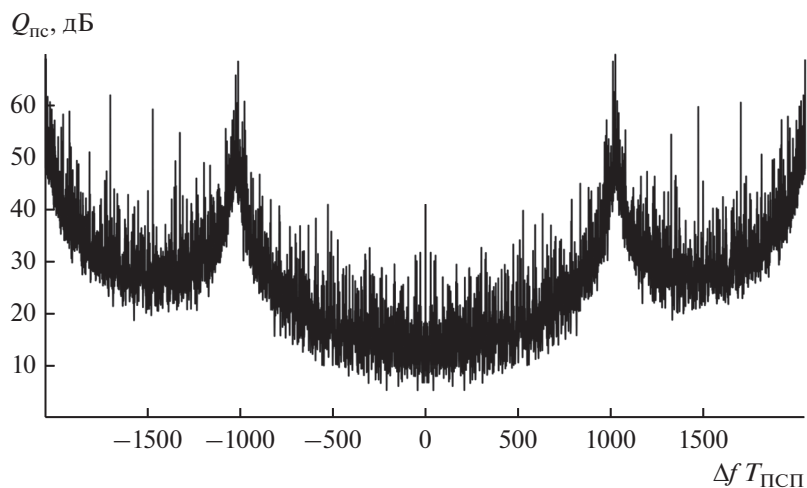


Рис. 4. Зависимость допустимого ($P = 0.99$) отношения “помеха/сигнал” от безразмерной частотной расстройки ГП $\Delta f T_{\text{ПСП}}$ при $K = 1$.

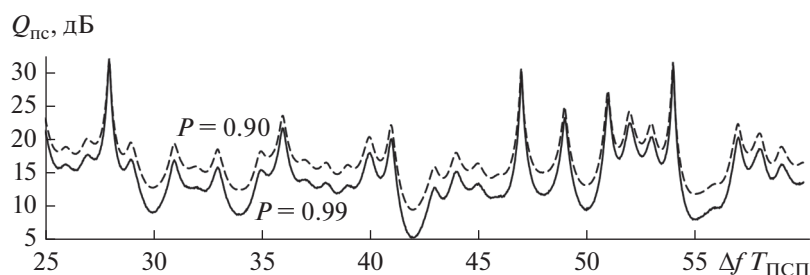
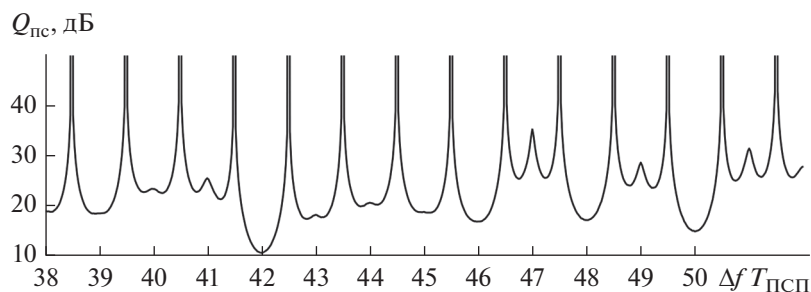
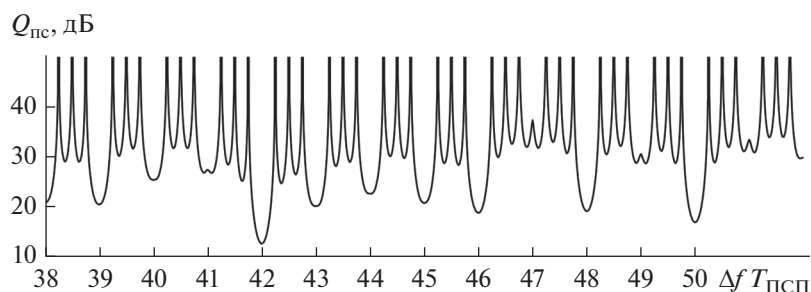


Рис. 5. Фрагмент зависимости $Q_{\text{пс}}(\Delta f T_{\text{ПСП}})$ при $K = 1$, $P = 0.99$ (сплошная кривая), $P = 0.9$ (штриховая).

при исследовании параметров, следует признать неблагоприятными, однако при точном совпадении частоты помехи с центральной частотой ШПС-ФМ наблюдается сравнительно незначительное влияние ГП. В тех случаях, когда частотное положение помехи приближается к границам лепестков спектра, допустимое отношение “помеха/сигнал” выше. Наименьшее влияние на качество процедуры поиска оказывает ГП, частотное положение которой совпадает с минимумами спектра, характерными для использованного ШПС-ФМ. Для первых боковых лепестков можно констатировать повышение допустимого уровня энергетического превосходства ГП над сигналом, они оказываются как бы на “пьедестале” относительно основного лепестка.

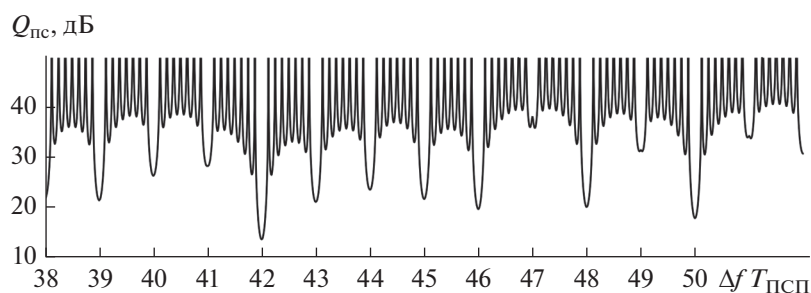
Анализируя графики $P(\Delta f)$, $Q_{\text{пс}}(\Delta f)$ в относительно узких частотных интервалах (см. рис. 2–3, 5–10), можно более детально изучить характер неравномерности этих зависимостей. При отношениях $q_{\text{пс}} > 15$ дБ наблюдается “квазиколебательное” поведение зависимости $P(\Delta f)$ с периодом, определяемым величиной, обратной периоду

ПСП. При повышении отношения $q_{\text{пс}}$ зависимость приобретает чашеобразную форму, причем значения верхних границ “чаши” и ее “дна” могут иметь отличия порядка десятков процентов, что представляется существенным. Сравнительно “близко расположенные” ГП, т.е. имеющие отличия частотного положения лишь на несколько единиц безразмерной расстройки $\Delta f T_{\text{ПСП}}$, могут оказывать существенно различное влияние на поиск сигнала. Установлено, что при таких оговоренных малых отличиях частотного положения ГП соответствующие им значения отношений $Q_{\text{пс}}$ изменяются на величины порядка единиц–десятков децибел и более. Показано, что при K -кратном когерентном накоплении характер зависимости $Q_{\text{пс}}(\Delta f)$ существенно изменяется (см. рис. 6–10) в сравнении со случаем $K = 1$ (см. рис. 5). При $K > 1$ увеличивается число частотных положений помехи, при которых ее влияние оказывается незначительным. Из рис. 6–10 видно, что между двумя ближайшими целыми значениями безразмерной частотной расстройки таких частот ГП оказывается $K - 1$. Такие особенности влияния

Рис. 6. Фрагмент зависимости $Q_{пс}(\Delta f T_{ПСП})$ при $K = 2$.Рис. 7. Фрагмент зависимости $Q_{пс}(\Delta f T_{ПСП})$ при $K = 4$.

ГП объясняются рядом факторов. В первую очередь к ним относится существенная неравномерность частотной характеристики процедуры корреляционной обработки, форма которой определяется видом опорной ПСП и числом производимых когерентных накоплений [48], а также неравномерность спектра рассмотренного ШПС-ФМ, имеющего значительные отклонения спектральных составляющих от *sinc*-огибающей [4, 49]. Наибольшее влияние помехи прослеживается при частотах ГП, кратных частоте повторения ПСП $1/T_{ПСП}$ (см. рис. 6–10), т.е. когда частота ГП близка или совпадает с частотой спектральной линии периодического ШПС-ФМ. На неравномерность зависимостей $P(\Delta f)$, $Q_{пс}(\Delta f)$ также влияет эффект “растекания” спектра, возникающий в случаях,

когда частоты ГП не кратны величине, обратной длительности интервала наблюдения [5]. Спектр помехи расширяется и ГП “повреждает” две и более спектральные линии ШПС-ФМ. В этом случае локальный минимум зависимостей $Q_{пс}(\Delta f)$ или $P(\Delta f)$ может оказаться смещенным относительно спектральной линии ШПС-ФМ. Влияние “растекания спектра” хорошо заметно на рис. 2–3 и 5 при $K = 1$. На рис. 6–10 это влияние прослеживается не так явно, хотя детальное рассмотрение результатов позволяет обнаружить, что на центральных областях выпуклых участков многих из полученных характеристик (на локальных минимумах) наблюдается деформация, характеризующаяся впадым сегментом. Таким образом, более опасной может оказаться ГП, частота которой

Рис. 8. Фрагмент зависимости $Q_{пс}(\Delta f T_{ПСП})$ при $K = 8$.

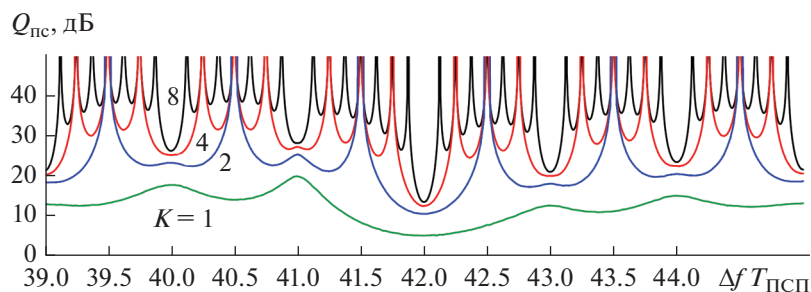


Рис. 9. Фрагмент зависимости $Q_{\text{пс}}(\Delta f T_{\text{ПСП}})$ при $K = 1, 2, 4$ и 8 .

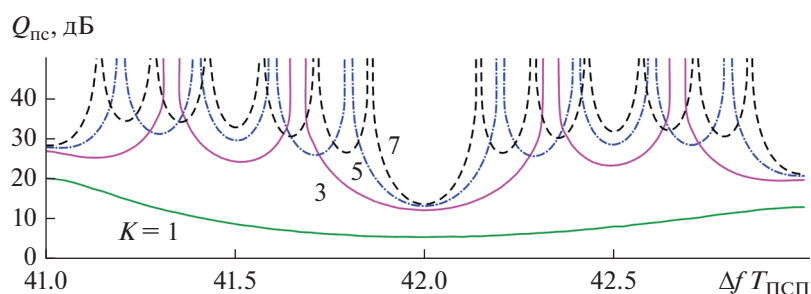


Рис. 10. Фрагмент зависимости $Q_{\text{пс}}(\Delta f T_{\text{ПСП}})$ при $K = 1, 3, 5$ и 7 .

смещена относительно частоты спектральной линии ШПС-ФМ, а в случае $K = 1$ (без накопления) — ГП, находящаяся между частотами спектральных линий ШПС-ФМ.

Достоверность полученных результатов подтверждается их согласованием, совпадением и не противоречием частным результатам известных публикаций. Так, “квазиколебательный” и/или неравномерный характер поведения статистических зависимостей для различных показателей качества демонстрируется в работах [24, 25, 27–29, 32–35, 40, 41, 44]. Неравномерность полученных зависимостей не противоречит известным экспериментальным результатам [50], демонстрирующим вариации значений отклика коррелятора на ГП с различной расстройкой. Наихудший случай частоты ГП для рассмотренного сигнала опубликован в работах [4, 32, 36, 41, 49], что совпадает с показанными результатами (см. рис. 5–10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено статистическое исследование эффективности процедуры беспорогового поиска ШПС-ФМ по задержке при наблюдении на фоне шума и однотоновой ГП. Реализация процедуры поиска выполнена на основе перевода временной реализации в частотную область, с последующим возвращением во временную область на основе прямого и обратного ДПФ соответствен-

но. Полученные количественные оценки вероятности правильного выполнения беспорогового поиска ШПС-ФМ по задержке, а также оценки допустимых уровней превышения ГП над сигналом, являются, безусловно, частными — полученными при конкретных значениях энергетического потенциала, центральной частоты сигнала, частоты дискретизации и многих других параметрах, установленных при моделировании. Результаты проведенного статистического исследования свидетельствуют о том, что при планировании сценариев натуральных и вычислительных экспериментов с целью повышения их достоверности и объективности следует тщательно обосновывать выбор параметров ГП. Случайный выбор параметров может приводить к получению неоправданно оптимистичных результатов при том или ином частотном положении помехи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ипатов В.П., Казаринов Ю.М., Коломенский Ю.А., Ульяницкий Ю.Д. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах. М.: Сов. радио, 1975.

2. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985.
3. *Dixon R.C.* Spread Spectrum Systems. N.Y.: Wiley, 1984.
4. Understanding GPS: Principles and Applications / Eds. E.D. Kaplan, C. J. Hegarty. Boston: Artech House, 2006.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010.
6. GNSS Interference Threats and Countermeasures / Ed. F. Dovis. Boston: Artech House, 2015.
7. *Кузьмин Е.В., Зограф Ф.Г.* // Успехи современ. радиоэлектроники. 2016. № 11. С. 137.
8. *Choi J.W., Cho N.I.* // Signal Processing. 2002. V. 82. № 12. P. 2003.
9. *Перов А.И., Болденков Е.Н.* // Радиотехника. 2006. № 7. С. 98.
10. *Borio D., Camoriano L., Presti L.Lo* // IEEE Systems J. 2008. V. 2. № 1. P. 38.
11. *Петров Е.Л., Петров И.Е., Абатуров С.Г.* // Т-Comm. 2010. № 4. С. 21.
12. *Chien Y.-R.* // IEEE Systems J. 2015. V. 9. № 2. P. 451.
13. *Авдеев В.А., Кошкаров А.С., Коннов Е.В.* // Журн. радиоэлектроники. 2015. № 10. <http://jre.cplire.ru/jre/oct15/12/text.html>.
14. *Mosavi M.R., Moghaddasi M.S., Rezaei M.J.* // Wireless Personal Commun. 2016. V. 90. № 3. P. 1563.
15. *Ren H., Wang Y., Jiang L., Wu S.* // Science China Information Sciences. 2016. V. 59. № 8. Article № 082201.
16. *Chen F., Nie J., Ni S. et al.* // Electron. Lett. 2017. V. 53. № 4. P. 274.
17. *Wang P., Cetin E., Dempster A.G. et al.* // IEEE Trans. 2018. V. AES-54. № 1. P. 416.
18. *Бельков С.А., Малыгин И.В.* // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22. № 2. С. 37.
19. *Khezzer Z. A., Benzid R., Saidi L.* // Traitement du Signal. 2020. V. 37. № 2. P. 169.
20. *Куликов Г.В., До Чунг Тиен* // Журн. радиоэлектроники. 2020. № 4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr20/9/text.pdf>.
21. *Lv Q., Qin H.* // IET Radar, Sonar Navigation. 2020. V. 14. № 9. P. 1430.
22. *Xu J., Ying S., Li H.* // Mobile Network Appl. 2020. V. 25. № 6. P. 2336.
23. *Aghadadashfam M., Mosavi M.R., Rezaei M.J.* // GPS Solutions. 2020. V. 24. № 4.
24. *Wei A., Shen L.* // Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China. 2008. V. 3. № 1. P. 79.
25. *Balaei A.T., Dempster A.G., Presti L.L.* // IEEE Trans. 2009. V. AES-45. № 4. P. 1418.
26. *Borio D.* // IEEE Trans. 2010. V. AES-46. № 1. P. 47.
27. *Motella B., Savasta S., Margaria D., Dovis F.* // IEEE Trans. 2011. V. AES-47. № 2. P. 1416.
28. *Liu Y., Ran Y., Ke T., Hu X.* // Signal Process. 2011. V. 91. № 4. P. 970.
29. *Jang J., Paonni M., Eissfeller B.* // IEEE Trans. 2012. V. AES-48. № 1. P. 243.
30. *Idris A.N., Sathyamoorthy D., Suldi A.M., Hamid J.R.A.* // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Sci. 2014. V. 18. Article № 012035 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012035>
31. *Abdizadeh M., Curran J.T., Lachapelle G.* // IEEE Trans. 2014. V. AES-50. № 4. P. 2794.
32. *Bek M.K., Shaheen E.M., Elgamel S.A.* // Navigation. J. Inst. Navigation. 2015. V. 62. № 1. P. 23.
33. *Qu Z., Yang J., Chen J.* // Wireless Personal Commun. 2015. V. 82. № 1. P. 473.
34. *Коратаев П.Д., Миронов В.А., Неровный В.В.* // Теория и техника радиосвязи. 2015. № 1. С. 15.
35. *Wang P., Wang Y., Yu X., Wu S.* // Wireless Personal Commun. 2016. V. 89. № 2. P. 405.
36. *Bek M.K., Shaheen E.M., Elgamel S.A.* // IET Radar, Sonar Navigation 2016. V. 10. № 5. P. 850.
37. *Неусыпин К.А., Сизых В.В., Шахтарин Б.И., Шевцев В.А.* // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 9. С. 621.
38. *Зеленевский В.В., Зеленевский А.В., Джелаухян А.Ю., Шмырин Е.В.* // REDS: Телекоммуникац. устройства и системы. 2016. Т. 6. № 1. С. 49.
39. *Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, Нестеров А.В., Лелюх А.А.* // Научно-технические технологии. 2018. № 11. С. 32.
40. *Шахин Э.М.* // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. № 3. С. 40.
41. *Shaheen E.M., Elgamel S.A.* // Defense Technol. 2019. V. 15. № 3. P. 440.
42. *Du R., Yue L., Yao S. et al.* // PIER M. 2019. V. 79. P. 61.
43. *Тузов Г.И.* Статистическая теория приема сложных сигналов. М.: Сов. радио, 1977.
44. *Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. и др.* Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью. М.: Радио и связь, 2003.
45. *Daigle J.N., Xiang N.* // J. Acoust. Soc. Amer. 2006. V. 119. № 1. P. 330.
46. *Leclère J., Botteron C., Landry R. J., Farine P.-A.* // Int. J. Navig. Obs. 2015. Article ID 765898. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/765898>
47. NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces. Rev: M. El Segundo: "SAIC", 21 May 2021. 245 p. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200M.pdf>.
48. *Кузьмин Е.В.* // Цифровая обработка сигналов. 2020. № 4. С. 13.
49. *Ward P.W.* // Navigation. J. Inst. of Navigation. 1994. V. 41. № 4. P. 367.
50. *Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И. и др.* Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. М.: Радио и связь, 1985.