

УДК 621.376

**РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ КОНТАКТА ПРИЕМНИКА РАДИОРАЗВЕДКИ
И СИГНАЛА С ППРЧ**

Бурлаков С.О.

*Профессор кафедры, доктор технических наук, профессор,
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, Россия*

Веркин С.С.

*Преподаватель, кандидат технических наук,
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, Россия*

Егрушев В.Е.

*Преподаватель, кандидат технических наук,
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, Россия*

Антонов В.В.

*Преподаватель,
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация: В статье получена зависимость вероятности обнаружения сигнала с ППРЧ от скорости сканирования полосы пропускания приемника радиоразведки, полосы частот и количества тактов ППРЧ.

Ключевые слова: Сигналы с программной перестройкой частоты, спектр сигнала, вероятность обнаружения, полоса пропускания, частотная модуляция.

**CALCULATION OF THE PROBABILITY OF THE CONTACT OF THE
RADIO SURVEY RECEIVER AND SIGNAL WITH FHSS**

Burlakov S.O.

Professor of the Department, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Military Academy of Communications Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Saint Petersburg, Russia

Verkin S.S.

Lecturer, Candidate of Technical Sciences, Military Academy of Communications Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Saint Petersburg, Russia

Egrushev V.E.

Lecturer, Candidate of Technical Sciences, Military Academy of Communications Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Saint Petersburg, Russia

Antonov V.V.

Lecturer, Military Academy of Communications Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Saint Petersburg, Russia

Abstract: The article obtained the dependence of the probability of detecting a signal with frequency hopping on the scanning speed of the bandwidth of the radio intelligence receiver, the frequency band and the number of clock cycles.

Key words: frequency-hopping spread spectrum, signal spectrum, detection probability, bandwidth, frequency modulation.

Современные средства радиосвязи широко используют сигналы с псевдослучайно перестраиваемой рабочей частотой (ППРЧ), что повышает их помехо- и разведзащищенность [1]. Оценим вероятности контакта приемника радиоразведки (РР) и сигнала с ППРЧ, что является необходимым условием его вскрытия. Предположим, что пространственные и энергетические условия обнаружения сигнала выполнены.

Поиск сигнала с ППРЧ характеризуется следующими параметрами: $[f_H, f_B]$ – частотный диапазон поиска; Δf_0 – ширина частотного диапазона поиска, Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

$\Delta f_0 = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$; $\Delta f_{\text{ППЧ}}$ – ширина полосы пропускания приемника радиоразведки (ширина окна поиска); γ – скорость перестройки приемника радиоразведки, Гц/с; $T_{\text{р}}$ – время принятия решения приемником поиска об установлении контакта.

Сигнал с ППРЧ характеризуется следующими параметрами: M – количество частотных позиций сигнала; f_i – значение i -й частотной позиции сигнала, $i = 1, \dots, M$; $T_{\text{ППРЧ}}$ – время нахождения сигнала на одной частотной позиции (длительность такта ППРЧ); $\Delta f_{\text{С}}$ – ширина частотного спектра сигнала на одной частотной позиции [2].

Предположим, что с целью увеличения γ поиск сигнала осуществляется при $\Delta f_{\text{ППЧ}} \ll \Delta f_{\text{С}}$. Это позволяет рассматривать $\Delta f_{\text{С}}$ и $\Delta f_{\text{ППЧ}}$ соответственно как точку и отрезок на частотной оси.

Представим, что в начальный момент верхняя частота окна поиска приемника радиоразведки имела значение f^* . Окно поиска в этот момент времени занимало участок диапазона от f^* до $f^* - \Delta f_{\text{ППЧ}}$. Будем предполагать, что приемник РР осуществляет сканирование диапазона $[f_{\text{н}}, f_{\text{в}}]$ снизу вверх (рис. 1).

Решим задачу для случая $T_{\text{р}} \leq T_{\text{ППРЧ}}$. Эта ситуация наиболее вероятна и неблагоприятна для средства связи. Скорость перестройки приемника радиоразведки связана с углом наклона движения окна поиска относительно оси времени $\gamma = \text{tg}(\alpha)$.

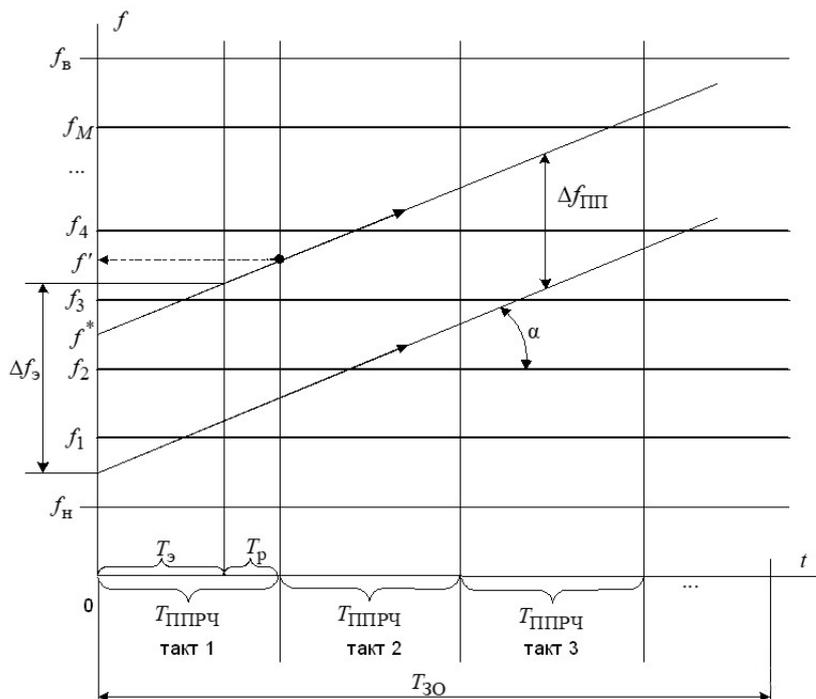


Рис. 1 - Иллюстрация к задаче определения вероятности контакта приемника РР и сигнала с ППРЧ (разработано автором)

За длительность одного такта ППРЧ в окно поиска приемника радиоразведки попадут частоты от $(f^* - \Delta f_{\text{ПП}})$ до $(f^* + \gamma T_{\text{ППРЧ}})$. С учетом времени принятия решения T_p установление контакта произойдет в меньшей полосе частот – от $(f^* - \Delta f_{\text{ПП}})$ до $(f^* + \gamma T_3)$, где T_3 – эквивалентная длительность такта ППРЧ, $T_3 = T_{\text{ППРЧ}} - T_p$.

Ширина эквивалентной полосы поиска за один такт ППРЧ $\Delta f_3 = \gamma T_3 + \Delta f_{\text{ПП}}$.

При равновероятном назначении частотных позиций контакт окна поиска и сигнала за один такт ППРЧ состоится с вероятностью $P_{k,1}(f^*) = n(f^*, \Delta f_3) / M$, где $n(f^*, \Delta f_3)$ – количество частотных позиций сигнала с ППРЧ, попавших на одном такте в полосу Δf_3 при начальной верхней частоте окна поиска f^* .

Для дальнейших вычислений нам удобнее оперировать с противоположной величиной – вероятностью неустановления контакта на одном шаге ППРЧ $\bar{P}_{k,1}(f^*) = 1 - P_{k,1}(f^*) = 1 - n(f^*, \Delta f_3) / M$.

Так как при входе приемника радиоразведки в зону обнаружения сигнала значение f^* неизвестно, то это значение f^* можно рассматривать как случайную величину, равномерно распределенную в полосе частот $[f_H, f_B]$. Будем считать, что $f_B > f_M + \Delta f_{\text{ПП}}$. Это упрощает дальнейшие вычисления, так как последняя частотная позиция сигнала f_M , аналогично остальным частотным позициям, будет полностью сканироваться частотным окном $\Delta f_{\text{Э}}$.

Изменяя f^* в диапазоне $[f_H, f_B]$, построим функцию $\bar{P}_{к,1}(f^*)$. Вид этой функции представлен на рис. 2.

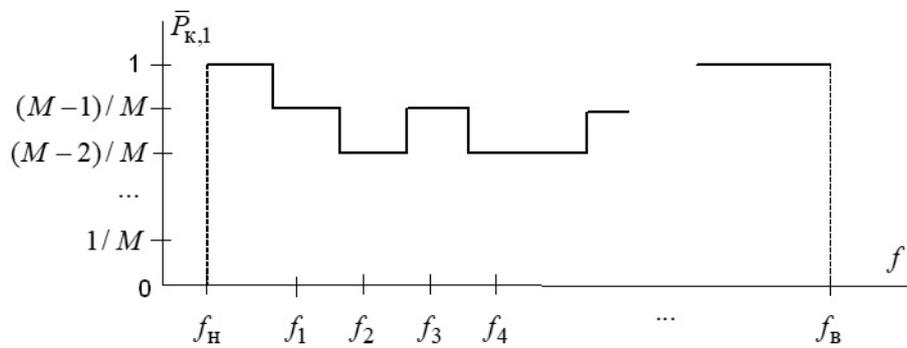


Рис. 2 - Зависимость вероятности неустановления контакта на одном такте ППРЧ (разработано автором)

Значение функции $\bar{P}_{к,1}(f^*)$ меняется только тогда, когда верхняя или нижняя частотная граница эквивалентной полосы поиска $\Delta f_{\text{Э}}$ пересекает частотные позиции сигнала Δf_i . Поэтому нет необходимости анализировать все значения f^* . Определив значение $\bar{P}_{к,1}(f_H)$, остальные значения $\bar{P}_{к,1}(f^*)$ можно получить максимум за $2M$ отсчетов.

При равновероятном распределении f^* по диапазону поиска вероятность неустановления контакта за один такт ППРЧ будет равна:

$$\bar{P}_{к,1} = \frac{1}{(f_B - f_H)} \int_{f_H}^{f_B} \bar{P}_{к,1}(f) df.$$

Вероятность установления контакта за один такт ППРЧ $P_{к,1} = 1 - \bar{P}_{к,1}$.

Для расчета вероятности обнаружения сигнала за два такта ППРЧ необходимо вероятность обнаружения сигнала за первый такт умножить на вероятность обнаружения сигнала за второй такт. Можно заметить, что начальная точка f^* за один такт переместилась в точку $(f^* + \gamma T_{\text{ППРЧ}})$. Поэтому вероятность обнаружения сигнала за второй такт ППРЧ уже содержится в функции $\bar{P}_{к,1}(f)$. Это значение $\bar{P}_{к,1}(f^* + \gamma T_{\text{ППРЧ}})$. Таким образом,

$$\bar{P}_{к,2}(f) = \begin{cases} \bar{P}_{к,1}(f) \times \bar{P}_{к,1}(f + \gamma T_{\text{ППРЧ}}), & \text{если } (f + \gamma T_{\text{ППРЧ}}) \leq f_{\text{в}} \\ \bar{P}_{к,1}(f) \times \bar{P}_{к,1}(f + \gamma T_{\text{ППРЧ}} - f_{\text{в}}), & \text{иначе} \end{cases}$$

Вероятность неустановления контакта за два такта ППРЧ:

$$\bar{P}_{к,2} = \frac{1}{(f_{\text{в}} - f_{\text{н}})} \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} \bar{P}_{к,2}(f) df$$

Вероятность установления контакта за два такта ППРЧ $P_{к,2} = 1 - \bar{P}_{к,2}$.

Аналогично изложенному выше, вероятность неустановления контакта за n тактов ППРЧ

$$\bar{P}_{к,n} = \frac{1}{(f_{\text{в}} - f_{\text{н}})} \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} \bar{P}_{к,n}(f) df, \text{ где}$$

$$\bar{P}_{к,n}(f) = \begin{cases} \bar{P}_{к,n-1}(f) \times \bar{P}_{к,1}(f + (n-1)\gamma T_{\text{ППРЧ}}), & \text{если } (f + (n-1)\gamma T_{\text{ППРЧ}}) \leq f_{\text{в}} \\ \bar{P}_{к,n-1}(f) \times \bar{P}_{к,1}(f + (n-1)\gamma T_{\text{ППРЧ}} - f_{\text{в}}) & \text{иначе} \end{cases} \quad (1)$$

Вероятность установления контакта за n тактов ППРЧ

$$P_{к,n} = 1 - \bar{P}_{к,n} \quad (2)$$

Предположим, что поиск сигнала с ППРЧ характеризуется параметрами:

- 1) частотный диапазон поиска соответствует диапазону работы средства связи;
- 2) ширина частотного диапазона поиска $\Delta f_0 = 0,5$ ГГц;

3) для ускорения принятия решения о контакте ширина полосы пропускания приемника радиоразведки (ширина окна поиска) приближена к максимальной $\Delta f_{\text{ПП}} = 80$ МГц;

4) скорость перестройки приемника радиоразведки $\gamma = 5,9$ МГц/с;

5) время принятия решения приемником поиска об установлении контакта $T_p = 0,5$ мс.

Сигнал с ППРЧ характеризуется следующими параметрами [3]:

1) количество частотных позиций сигнала $M = 7$;

2) время нахождения сигнала на одной частотной позиции (длительность такта ППРЧ) $T_{\text{ППРЧ}} = 1,7$ мс.

Зависимость вероятности обнаружения сигнала от количества тактов ППРЧ n представлена на рис. 3. Эта зависимость представляет собой функцию вероятности установления контакта приемника радиоразведки и сигнала с ППРЧ от времени.

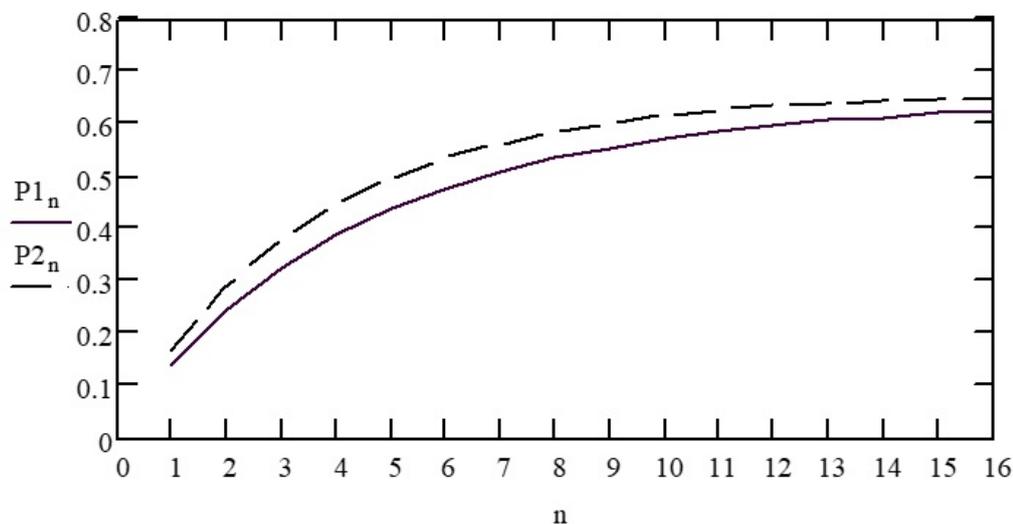


Рис. 3 - Вероятность контакта приемника поиска и сигнала с ППРЧ:

сплошная линия – полоса пропускания приемника РР 80 МГц;

пунктирная линия – полоса пропускания приемника РР 100 МГц.

(разработано автором)

Библиографический список

1. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. - М.: РадиоСофт, 2008.
2. Елишев В.В, Почивалов С.Г. Метод повышения помехоустойчивости космических систем связи с быстрой псевдослучайной перестройкой рабочей частоты в условиях радиоэлектронного подавления // Сборник трудов Военнокосмической академии имени А.Ф.Можайского. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016.
3. Time-Frequency Signal Analysis and Processing - A Comprehensive Reference / ed. by B. Boashash. Oxford: Elsevier Science, 2003. 771 p.

Оригинальность 89%