

УДК 621.396.62

А.С. Подстригаев, В.П. Лихачев, М.В. Ляпин, Н.Е. Липаков

Анализ вероятностных характеристик матричного приемника с учетом неоднозначности определения частоты на стыках каналов

Предложен способ оценки величины неоднозначности определения частоты, возникающей на стыках каналов матричного приемника. Представлены результаты численного эксперимента по оценке и сравнению вероятностных характеристик матричного приемника с учетом и без учета неоднозначности. Выполнен анализ полученных вероятностных характеристик.

Ключевые слова: неоднозначность, матричный приемник, стык каналов, вероятность ложной тревоги, вероятность правильного обнаружения, неоднозначность определения частоты, энергетический приемник, сложная сигнальная обстановка, интеграл вероятности.

Вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения сигнала являются важными характеристиками приемного устройства. В средствах радиотехнической разведки (РТР), для которых параметры сигнала (частота, фаза, амплитуда) априорно неизвестны, целесообразно использовать энергетическое обнаружение и критерий Неймана–Пирсона. Согласно критерию при заданном уровне вероятности ложной тревоги минимизируется вероятность пропуска цели или, что то же самое, максимизируется вероятность правильного обнаружения.

Однако в широко используемых в средствах РТР матричных приемниках, имеющих несколько последовательных ступеней с параллельными частотными каналами в каждой, возникает неоднозначность определения частоты, которая приводит к увеличению вероятности ложной тревоги. Одной из причин неоднозначности [1] является наклон скатов амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) реальных каналов в отличие от используемой при расчетах идеализированной модели, в которой АЧХ каналов имеют прямоугольную форму. При попадании мощного сигнала в смежную область соседних каналов срабатывают детекторы в обоих каналах, и сигналу присваиваются два значения, одно из которых является ложным. Вероятность ложной тревоги, обусловленная перекрытием, в каждом отдельно взятом канале зависит от обнаружения сигналов, попавших на участки высокого коэффициента передачи за пределами полосы пропускания канала. При увеличении мощности принимаемого сигнала он может обнаруживаться соседним каналом все дальше от стыка каналов. Таким образом, растет ширина полосы на стыке каналов, при попадании в которую возникает неоднозначность.

Цель настоящей статьи – количественно оценить и сравнить вероятностные характеристики матричного приемника с учетом и без учета неоднозначности определения частоты на стыках каналов.

Для этого необходимо определить вероятность ложной тревоги приемника, рассчитанную с учетом неоднозначности определения частоты на стыках каналов, сравнить ее с той же величиной, рассчитанной без учета неоднозначности, а также оценить изменение вероятности правильного обнаружения с учетом неоднозначности определения частоты.

Расчет вероятности ложной тревоги без учета неоднозначности определения частоты на стыках каналов. Вначале рассмотрим выражения без учета неоднозначности для канала $l = \overline{1, L}$, где L – количество каналов в ступени (рис. 1).

Вероятность ложной тревоги в канале l определяется как [2]

$$P_{лтl} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{(h/N_0) - T_H \Delta f_{ш}}{\sqrt{2T_H \Delta f_{ш}}} \right) \right], \quad (1)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-t^2/2) dt$ – интеграл вероятностей; h – порог обнаружения; N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности белого шума; T_H – время наблюдения входного процесса; $\Delta f_{ш} \approx 1,1 \Delta f_l$ – шумовая полоса канала l (Δf_l – полоса пропускания канала по уровню минус 3 дБ) [3].

Из выражения (1) видно, что вероятность срабатывания обнаружителя зависит от соотношения порога обнаружения h и энергии шума с плотностью N_0 в полосе $\Delta f_{\text{ш}}$, накопленного за время T_H .

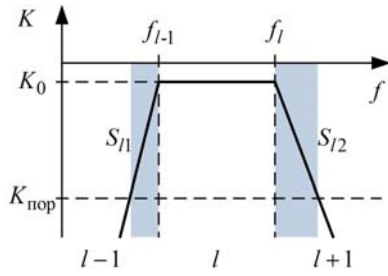


Рис. 1. Аппроксимированная АЧХ канала

В предположении, что ложные обнаружения сигнала в каналах одной ступени являются статистически независимыми совместными событиями, возможными в каждом канале, и каждое событие приводит к ложной тревоге, а также в соответствии с теоремой сложения вероятностей для нескольких совместных событий [4], вероятность ложной тревоги для одной ступени матричного приемника составит

$$P_{\text{лт } L\Sigma} = \sum_{i=1}^L P_{\text{лт } i} - \sum_{j=1}^{L-1} \sum_{i=1+j}^L P_{\text{лт } i} P_{\text{лт } j} + \sum_{k=1}^{L-2} \sum_{j=1+k}^{L-1} \sum_{i=1+j}^L P_{\text{лт } i} P_{\text{лт } j} P_{\text{лт } k} - \dots + (-1)^{L-1} \prod_{p=1}^L P_{\text{лт } p}. \quad (2)$$

Далее можно принять частотные характеристики каждого канала одинаковыми, и соответственно вероятности ложной тревоги в каждом канале одной ступени будут равны. Тогда выражение (2) с учетом правил комбинаторики [5] преобразуется к следующему виду:

$$P_{\text{лт } L\Sigma} = L P_{\text{лт } l} - \frac{L!}{2!(L-2)!} P_{\text{лт } l}^2 + \frac{L!}{3!(L-3)!} P_{\text{лт } l}^3 - \frac{L!}{4!(L-4)!} P_{\text{лт } l}^4 + \dots + (-1)^{L-1} L P_{\text{лт } l}^L. \quad (3)$$

Соответственно вероятность ложной тревоги M -ступенчатого матричного приемника, содержащего L каналов в каждой ступени, рассчитанная без учета перекрытия каналов, равна

$$P_{\text{лт пр}} = \sum_{i=1}^M P_{\text{лт } L\Sigma i} - \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1+j}^M P_{\text{лт } L\Sigma i} P_{\text{лт } L\Sigma j} + \sum_{k=1}^{M-2} \sum_{j=1+k}^{M-1} \sum_{i=1+j}^M P_{\text{лт } L\Sigma i} P_{\text{лт } L\Sigma j} P_{\text{лт } L\Sigma k} - \dots + (-1)^{M-1} \prod_{p=1}^M P_{\text{лт } L\Sigma p}, \quad (4)$$

Очевидно, что вероятность ложной тревоги в каждой ступени будет отличаться. Поэтому упростить выражение (4), аналогично (3), нельзя.

Для широко используемого двухступенчатого матричного приемника выражение (4) будет выглядеть следующим образом:

$$P_{\text{лт пр}} = P_{\text{лт } L\Sigma 1} + P_{\text{лт } L\Sigma 2} - P_{\text{лт } L\Sigma 1} P_{\text{лт } L\Sigma 2}. \quad (5)$$

Расчет вероятности ложной тревоги с учетом неоднозначности определения частоты на стыках каналов. Теперь получим выражения для вероятности ложной тревоги с учетом неоднозначности.

Выражение для полезного сигнала с учетом его попадания за границы канала l :

$$s'_l(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{f_H}^{f_{l-1}} K_l(j\omega) S(\omega) e^{j\omega t} d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{f_l}^{f_B} K_l(j\omega) S(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (6)$$

где знак «штрих» означает рассмотрение характеристик канала и сигналов за пределами канала; f_H, f_B — нижняя и верхняя границы диапазона рабочих частот (ДРЧ) ступени; f_{l-1}, f_l — нижняя и верхняя границы канала l ; $K_l(j\omega)$ — частотный коэффициент передачи канала l .

Выражение (6) описывает мощность сигнала с учетом АЧХ канала за пределами его полосы пропускания, т.е. от нижней границы диапазона рабочих частот ступени f_H до нижней граничной частоты канала f_{l-1} и от верхней граничной частоты канала f_l до верхней границы ДРЧ f_B . Так как наличие сигнала в полосе пропускания l -го канала не приводит к ложной тревоге, то в полосе от f_{l-1} до f_l значение сигнала принято равным нулю.

Считаем, что время наблюдения T_H воздействия на входе приемника достаточно велико, и оценка мощности P_l^* входного процесса приобретает нормальное распределение. Тогда при оптимальном пороговом уровне обнаружения вероятность обнаружения сигнала вне полосы канала l составит [2]

$$P_{\text{обн}l}' = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{\frac{h}{N_0} - T_H \Delta f_{\text{ш}} - \frac{Q_l'}{N_0}}{\sqrt{2 \left(T_H^2 \Delta f_{\text{ш}}^2 + \frac{Q_l'}{N_0} \right)}} \right) \right], \quad (7)$$

где $Q_l' = \int_0^{T_H} s_l^2(t) dt$ – энергия, выделяемая полезным сигналом на выходе канала l за время T_H .

В отличие от выражения (1) в выражении (7) вероятность срабатывания обнаружителя зависит не только от энергии шума, но и от энергии сигнала, попадающего за пределы частотного канала l .

Тогда определяемая выражением (1) вероятность ложной тревоги в канале l должна быть уточнена на величину $P'_{\text{обн}l}$. В предположении, что ложное обнаружение сигнала в канале l при его отсутствии и попадание сигнала за пределы канала l – статистически независимые совместные события, и возможны оба события, каждое из которых приводит к ложной тревоге [4]:

$$P'_{\text{лт}l} = P_{\text{лт}l} + P'_{\text{обн}l} - P_{\text{лт}l} P'_{\text{обн}l}. \quad (8)$$

Основываясь на свойстве комплементарности взаимно противоположных событий, полученное выражение можно также представить в следующем виде:

$$P'_{\text{лт}l} = 1 - P_{\text{но}l} P'_{\text{пр}l}, \quad (9)$$

где $P_{\text{но}l} = 1 - P_{\text{лт}l}$ – вероятность правильного необнаружения сигнала в канале l , $P'_{\text{пр}l} = 1 - P'_{\text{обн}l}$ – вероятность пропуска сигнала вне полосы канала l .

С учетом (1), (7) выражение (9) можно представить следующим образом:

$$P'_{\text{лт}l} = 1 - \frac{1}{4} \left[1 + \Phi \left(\frac{\frac{h}{N_0} - T_H \Delta f_{\text{ш}}}{\sqrt{2 T_H \Delta f_{\text{ш}}}} \right) \right] \left[1 + \Phi \left(\frac{\frac{h}{N_0} - T_H \Delta f_{\text{ш}} - \frac{Q_l'}{N_0}}{\sqrt{2 \left(T_H^2 \Delta f_{\text{ш}}^2 + \frac{Q_l'}{N_0} \right)}} \right) \right], \quad (10)$$

где h определяется критерием обнаружения.

Учитывая рассуждения, приведенные при выводе формул (2), (3), вероятность ложной тревоги для одной L -канальной ступени матричного приемника составит

$$P'_{\text{лт}L\Sigma} = L P'_{\text{лт}l} - \frac{L!}{2!(L-2)!} P_{\text{лт}l}^2 + \frac{L!}{3!(L-3)!} P_{\text{лт}l}^3 - \frac{L!}{4!(L-4)!} P_{\text{лт}l}^4 + \dots + (-1)^{L-1} L P_{\text{лт}l}^L. \quad (11)$$

По аналогии с выражением (4) вероятность ложной тревоги для M -ступенчатого матричного приемника, содержащего L_m каналов в каждой ступени ($m = \overline{1, M}$), составит

$$P'_{\text{лт пр}} = \sum_{i=1}^M P'_{\text{лт}L\Sigma i} - \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1+j}^M P'_{\text{лт}L\Sigma i} P'_{\text{лт}L\Sigma j} + \sum_{k=1}^{M-2} \sum_{j=1+k}^{M-1} \sum_{i=1+j}^M P'_{\text{лт}L\Sigma i} P'_{\text{лт}L\Sigma j} P'_{\text{лт}L\Sigma k} - \dots + (-1)^{L-1} \prod_{p=1}^L P'_{\text{лт}L\Sigma p}. \quad (12)$$

Для двухступенчатого приемника вероятность ложной тревоги с учетом неоднозначности определения частоты, связанной с попаданием сигнала на стыки соседних каналов, составит

$$P'_{\text{лт пр}} = P'_{\text{лт}L\Sigma 1} + P'_{\text{лт}L\Sigma 2} - P'_{\text{лт}L\Sigma 1} P'_{\text{лт}L\Sigma 2}. \quad (13)$$

При выводе выражений (11)–(13) вероятность ложной тревоги $P'_{\text{лт}l}$ была принята одинаковой для всех каналов. Это равносильно тому, что сигнал, увеличивающий $P_{\text{лт}l}$, попадает в каждый канал, что теоретически возможно в условиях сложной радиоэлектронной обстановки (РЭО). Данный случай можно считать предельным, поскольку количество сигналов, большее, чем количество каналов в ступени, без принятия специальных мер приведет к неоднозначности определения частоты в следующей ступени.

Однако на практике наиболее вероятным является попадание на вход приемника за время наблюдения T_H только одного сигнала. Поэтому при расчете величины $P'_{\text{лт } L\Sigma}$ по выражению (11) целесообразно принять вероятность ложной тревоги одного канала (например, первого, $l=1$) равной $P'_{\text{лт } l}$, определяемой по выражению (10), а для остальных каналов ($l=2, \dots, L$) вероятность $P_{\text{лт } l}$ определять по выражению (1). Аналогично, если требуется рассмотреть случай одновременного попадания на вход приемника двух сигналов (в разные каналы), вероятность ложной тревоги для двух каналов рассчитывается по выражению (10), а для оставшихся – по (1).

При приеме одного сигнала вероятность ложной тревоги для одной L -канальной ступени матричного приемника запишется в виде следующего ряда:

$$\begin{aligned}
 P'_{\text{лт } L\Sigma(1)} = & P'_{\text{лт } 1} + \sum_{i=2}^L P_{\text{лт } i} - \left(\sum_{j=2}^{L-1} \sum_{i=1+j}^L P_{\text{лт } i} P_{\text{лт } j} + \sum_{i=2}^L P_{\text{лт } i} P'_{\text{лт } 1} \right) + \\
 & + \left(\sum_{k=2}^{L-2} \sum_{j=1+k}^{L-1} \sum_{i=1+j}^L P_{\text{лт } i} P_{\text{лт } j} P_{\text{лт } k} + \sum_{j=2}^{L-1} \sum_{i=1+j}^L P_{\text{лт } i} P_{\text{лт } j} P'_{\text{лт } 1} \right) - \\
 & - \left(\sum_{n=2}^{L-3} \sum_{k=1+n}^{L-2} \sum_{j=1+k}^{L-1} \sum_{i=1+j}^L P_{\text{лт } i} P_{\text{лт } j} P_{\text{лт } k} P_{\text{лт } n} + \sum_{k=2}^{L-2} \sum_{j=1+k}^{L-1} \sum_{i=1+j}^L P_{\text{лт } i} P_{\text{лт } j} P_{\text{лт } k} P'_{\text{лт } 1} \right) + \\
 & + \dots + (-1)^{L-1} P'_{\text{лт } 1} \prod_{p=2}^L P_{\text{лт } p}. \tag{14}
 \end{aligned}$$

Принимая частотные характеристики каждого канала одинаковыми, после преобразования выражения (14) получим

$$\begin{aligned}
 P'_{\text{лт } L\Sigma(1)} = & P'_{\text{лт } 1} + (1 - P'_{\text{лт } 1}) \left[\frac{(L-1)!}{1!(L-2)!} P_{\text{лт } l} - \frac{(L-1)!}{2!(L-3)!} P_{\text{лт } l}^2 + \frac{(L-1)!}{3!(L-4)!} P_{\text{лт } l}^3 - \frac{(L-1)!}{4!(L-5)!} P_{\text{лт } l}^4 + \dots \right. \\
 & \left. \dots + (-1)^{L-2} \frac{(L-1)!}{(L-2)!!} P_{\text{лт } l}^{L-2} \right] + (-1)^{L-1} (L-1) P_{\text{лт } l}^{L-1}. \tag{15}
 \end{aligned}$$

Расчет вероятности ложной тревоги в M -ступенчатом матричном приемнике, содержащем L_m каналов в каждой ступени ($m=1, \dots, M$), будет зависеть от того, попадает ли сигнал на стыки каналов в следующих после первой ступенях. В общем случае если сигнал попадает на стыки каналов в каждой ступени, увеличивая вероятность ложной тревоги, выражение для вероятности ложной тревоги в приемнике имеет вид

$$\begin{aligned}
 P'_{\text{лт пр}} = & \sum_{i=1}^M P'_{\text{лт } L\Sigma i} - \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1+j}^M P'_{\text{лт } L\Sigma i} P'_{\text{лт } L\Sigma j} + \sum_{k=1}^{M-2} \sum_{j=1+k}^{M-1} \sum_{i=1+j}^M P'_{\text{лт } L\Sigma i} P'_{\text{лт } L\Sigma j} P'_{\text{лт } L\Sigma k} - \\
 & - \sum_{n=1}^{M-3} \sum_{k=1+n}^{M-2} \sum_{j=1+k}^{M-1} \sum_{i=1+j}^M P'_{\text{лт } L\Sigma i} P'_{\text{лт } L\Sigma j} P'_{\text{лт } L\Sigma k} P'_{\text{лт } L\Sigma n} + \dots + (-1)^{L-1} \prod_{p=1}^L P'_{\text{лт } L\Sigma p}. \tag{16}
 \end{aligned}$$

Для двухступенчатого приемника, в котором в обеих ступенях выполняется перенос частоты в общий (для ступени) диапазон промежуточных частот (ПЧ), вероятность ложной тревоги с учетом неоднозначности определения частоты, связанной с попаданием сигнала на стыки соседних каналов, составит

$$P'_{\text{лт пр}} = P'_{\text{лт } L\Sigma 1} + P'_{\text{лт } L\Sigma 2} - P'_{\text{лт } L\Sigma 1} P'_{\text{лт } L\Sigma 2}. \tag{17}$$

Если во второй ступени преобразование частоты не выполняется, и она построена по принципу многоканального приемника, то попадание сигналов на стыки каналов не приводит к неоднозначности и соответственно

$$P'_{\text{лт пр}} = P'_{\text{лт } L\Sigma 1} + P_{\text{лт } L\Sigma 2} - P'_{\text{лт } L\Sigma 1} P_{\text{лт } L\Sigma 2}. \tag{18}$$

Это же выражение описывает вероятность ложной тревоги в приемнике, если во второй ступени используется перенос частоты, но сигнал не попадает на стыки каналов (или его влияние настолько мало, что им можно пренебречь).

Расчет вероятности правильного обнаружения сигнала. При попадании сигнала в область граничной частоты канала происходит ответвление мощности в соседний канал. Однако поскольку сверхвысокочастотные делители и ответвители мощности имеют развязку не менее 20 дБ [6], при выводе выражений для вероятности правильного обнаружения утечкой мощности в соседние каналы можно пренебречь.

Вероятность правильного обнаружения сигнала в канале l на фоне аддитивного гауссова шума [2]

$$P_{\text{пол}l} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{\frac{h}{N_0} - T_H \Delta f_{\text{ш}} - \frac{Q_l}{N_0}}{\sqrt{2 \left(T_H^2 \Delta f_{\text{ш}}^2 + \frac{Q_l}{N_0} \right)}} \right) \right], \quad (19)$$

где $Q_l = \int_0^{T_H} s_l^2(t) dt$ – энергия, выделяемая полезным сигналом на выходе канала l за время T_H .

По аналогии с выражением (2) вероятность правильного обнаружения сигнала ступенью равна:

$$P_{\text{по}L\Sigma} = \sum_{i=1}^L P_{\text{по}i} - \sum_{j=1}^{L-1} \sum_{i=1+j}^L P_{\text{по}i} P_{\text{по}j} + \sum_{k=1}^{L-2} \sum_{j=1+k}^{L-1} \sum_{i=1+j}^L P_{\text{по}i} P_{\text{по}j} P_{\text{по}k} - \dots + (-1)^{L-1} \prod_{p=1}^L P_{\text{по}p}. \quad (20)$$

Учитывая, что неотъемлемой составляющей процесса обнаружения в РТР является селекция сигнала по частоте, для которой должны сработать обнаружители по всему пути прохождения сигнала, обнаружение сигнала приемником выполняется только при совместном обнаружении во всех ступенях. Соответственно вероятность правильного обнаружения сигнала M -ступенчатым матричным приемником составит

$$P_{\text{по пр}} = \prod_{i=1}^M P_{\text{по}L\Sigma i}. \quad (21)$$

Практическое применение выражений для оценки неоднозначности. Для количественной оценки вероятностных характеристик матричного приемника с учетом и без учета неоднозначности выполнено численное моделирование в программной среде MATLAB.

В качестве модели выбран двухступенчатый приемник с полосой рабочих частот 10 ГГц (рис. 2). Первая ступень приемника содержит 20 каналов, различающихся частотным исполнением. Полосы пропускания каналов $\Delta f_1 \dots \Delta f_{20}$ задаются входными полосовыми фильтрами. Для получения одного диапазона ПЧ $\Delta f_{\text{ПЧ}}$ подобраны частоты гетеродинов $\Delta f_{Г1} \dots \Delta f_{Г20}$. Вторая ступень включает 10 идентичных каналов. Соответственно полоса каждого канала первой ступени – 500 МГц, канала второй ступени – 50 МГц. В исходном состоянии каналы первой ступени принудительно закрыты и подключены к сумматору. Выход сумматора соединен со входом второй ступени. При обнаружении сигнала в одном из каналов он открывается и таким образом подключается ко второй ступени. Вторая ступень является детекторным многоканальным приемником без переноса спектра сигнала в диапазон промежуточных частот. С выходов десяти каналов второй ступени сигнал поступает на соответствующие входы устройства цифровой обработки (УЦО). Таким образом, неоднозначность определения частоты возникает только в первой ступени, так как во второй ступени отсутствует перенос в единый диапазон ПЧ. Соответственно в выражениях для расчета вероятностных характеристик неоднозначность во второй ступени не учитывается.

Для практики важное значение имеет случай, при котором для каждого канала учитывается влияние АЧХ только в двух смежных каналах (или в одном соседнем канале, если рассматриваемый канал является крайним в ДРЧ). Причем без существенных потерь в точности вычислений коэффициент передачи можно задать линейной аппроксимацией, учитывающей крутизну скатов частотной характеристики. На участке от f_{l-2} до f_{l-1} коэффициент передачи $K_l(\omega)$ описывается выражением $K_l(\omega) = K_0 + S_{l1}\omega$, на участке от f_{l-1} до f_l – выражением $K_l(\omega) = K_0$, на участке от f_l до f_{l+1} – выражением $K_l(\omega) = K_0 - S_{l2}\omega$, где K_0 – величина коэффициента передачи в полосе пропускания канала; S_{l1}, S_{l2} – значения крутизны левого и правого скатов АЧХ соответственно (см. рис. 1).

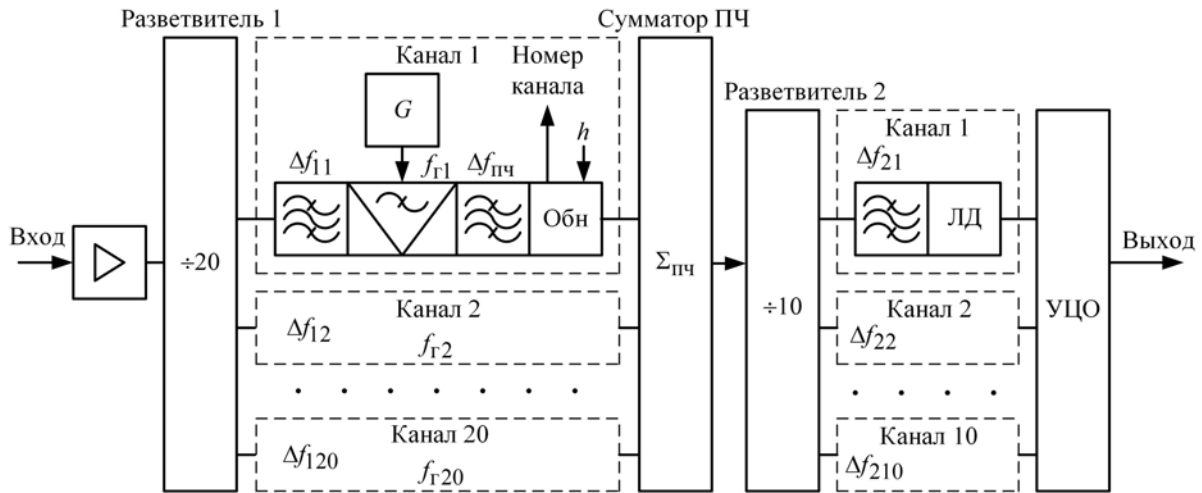


Рис. 2. Схема матричного приемника

При моделировании были заданы следующие параметры: время наблюдения $T_H = 50$ мс; спектральная плотность мощности шума $N_0 = 5 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц; крутизна скатов АЧХ первой ступени $S_{I1} = S_{I2} = 120$ дБ/Гц; крутизна скатов АЧХ второй ступени $S_{I1} = S_{I2} = 200$ дБ/Гц; коэффициент передачи в полосе пропускания $K_0 = -3$ дБ. Величина порога обнаружения h выбиралась так, чтобы вероятность ложной тревоги приемника в отсутствие полезного сигнала была равна $10^{-8} \dots 10^{-7}$.

Вероятность ложной тревоги приемника без учета неоднозначности была задана на уровне $P_{лт пр} = 6,632 \cdot 10^{-8}$. При этом пороги обнаружения в каналах первой и второй ступени, в соответствии с выражениями (1), (3), (5), выбраны равными $h_1 = h_2 = h = 8,5 \cdot 10^{-13}$ Дж. При заданном времени наблюдения этим порогам соответствуют пороги обнаружения по мощности $h_{p1} = h_{p2} = h_p = -107,7$ дБ(Вт).

В результате вычислений в MATLAB на основе полученных в настоящей работе выражений в соответствии с принятыми параметрами получены следующие характеристики:

- зависимость вероятности ложной тревоги приемника от мощности сигнала $P'_{лт пр}(P_c)$ при удалении несущей сигнала от границы канала Δf_{i-1} (рис. 3, а, б), рассчитанная по выражениям (10), (11), (13), (15), (18);

- зависимость вероятности ложной тревоги от удаления несущей от границы канала $P'_{лт пр}(\Delta f_{i-1})$ при заданных значениях мощности сигнала P_c (рис. 4), полученная по выражениям (10), (15), (18);

- зависимость вероятности правильного обнаружения от мощности входного сигнала в основном канале $P_{по пр}(P_c)$, рассчитанная по выражениям (19)–(21), при различных значениях порога обнаружения, соответствующего заданной вероятности ложной тревоги $P_{лт пр}$, рассчитанной по (21) при соответствующей мощности сигнала в соседнем канале, при фиксированной отстройке от границы канала $\Delta f_{i-1} = 50$ МГц (рис. 5).

Характеристики на рис. 3 и 4 позволяют оценить зависимость вероятности ложной тревоги от изменения мощности полезного сигнала на входе приемника и отстройки по частоте от границы частотного канала. При этом на рис. 3 рассмотрены два крайних случая: попадание сигнала на границу одного из каналов, рассчитанное по выражениям (10), (15), (18), и попадание во все 20 каналов первой ступени, рассчитанное по выражениям (10), (11), (13). Второе событие маловероятно на практике, однако его моделирование показывает незначительное увеличение вероятности ложной тревоги, что связано с близостью величин $P'_{лт пр}(\Delta f_{i-1})$ и $P'_{лт пр}(\Delta f_{i-1})$. Как видно из рис. 3, для заданной вероятности ложной тревоги при попадании сигналов во все каналы достаточно уровня сигнала приблизительно на 2,75 дБ меньше, чем при попадании в один канал, причем независимо от вели-

чины отстройки. Во многих случаях этой величиной можно пренебречь и работать только с одной из двух характеристик, независимо от количества одновременно принимаемых сигналов.

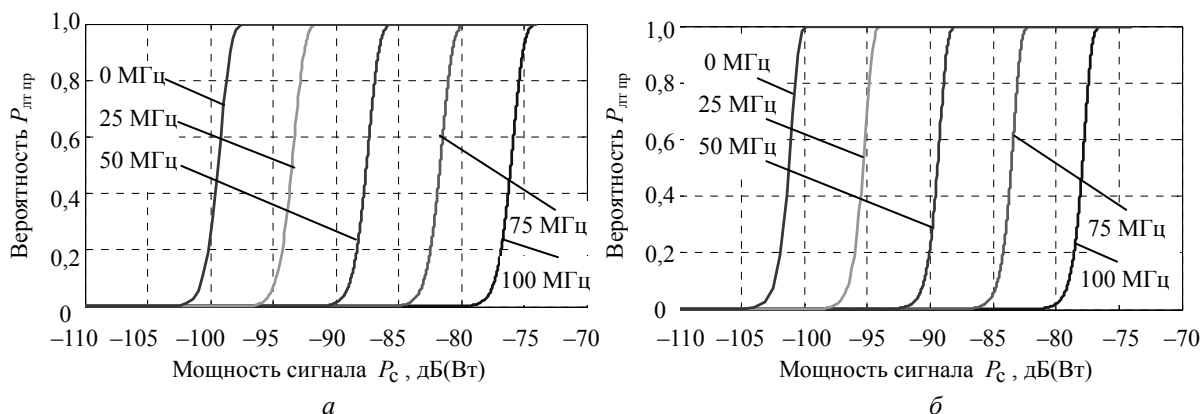
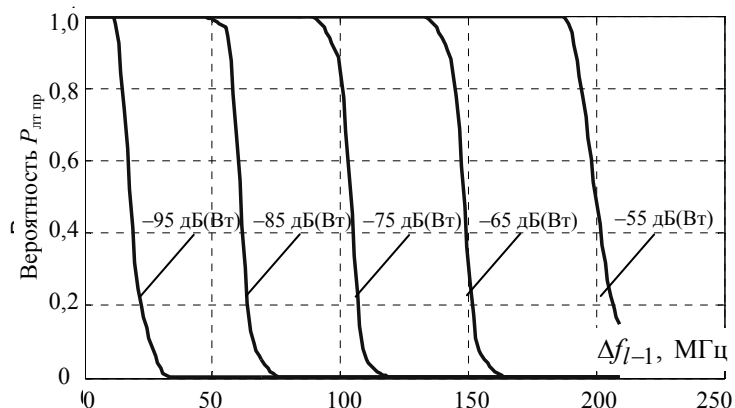


Рис. 3. Зависимость вероятности ложной тревоги от мощности сигнала при удалении несущей сигнала от границы канала: *а* – попадание в один канал первой ступени; *б* – попадание в 20 каналов первой ступени

Согласно рис. 3 и 4, приближенно учтенная неоднозначность определения частоты, возникающая при перекрытии соседних частотных каналов, для рассматриваемого приемника дает существенное увеличение вероятности ложной тревоги. Так, при отсутствии сигнала в канале $P_{лп пр} = 6,632 \cdot 10^{-8}$, а при его наличии в соседнем канале вероятность ложной тревоги может повышаться до единицы. Этот факт необходимо принимать в расчет при оценке характеристик проектируемого или имеющегося матричного приемника.

Рис. 4. Зависимость вероятности ложной тревоги от удаления несущей от границы канала при заданных значениях мощности сигнала

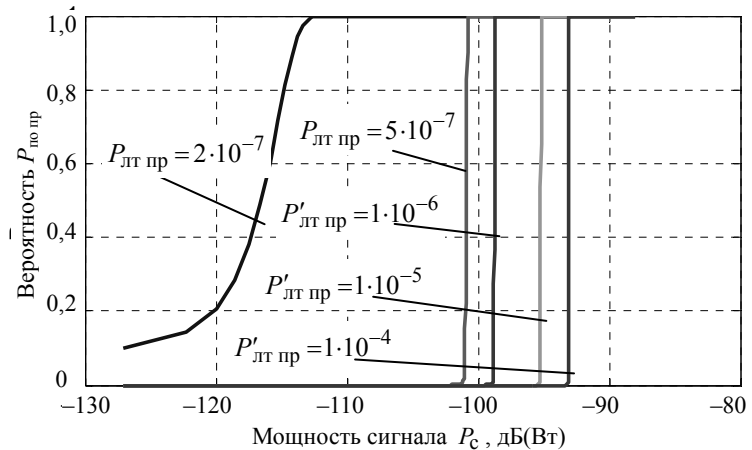


При отстройке по частоте от границы канала на 100 МГц для получения вероятности ложной тревоги $P'_{лп пр} = 1$ и соответственно безусловного ложного срабатывания обнаружителя достаточно уровня входного сигнала $P_c = -73$ дБ(Вт). А при отстройке на 50 МГц он уменьшается до $P_c = -85$ дБ(Вт). Учитывая, что для современных и перспективных приемников средств РТР динамический диапазон (ДД) принимаемых сигналов должен быть не менее 40 дБ от уровня чувствительности, а чувствительность не выше минус 90 дБ(Вт), подобные срабатывания являются недопустимыми. Поэтому для обеспечения заданного уровня вероятности ложной тревоги приемника $P'_{лп пр}$ при попадании сигнала в смежную область соседних каналов необходимо принимать специальные меры.

Одной из таких мер является повышение порога обнаружения. При этом вероятность правильного обнаружения сигнала приемником $P_{по пр}$ уменьшается. При наличии сигнала на входе приемника обеспечить $P'_{лп пр} = 10^{-8} \dots 10^{-7}$ становится практически невозможным, в связи с чем целесообразно поддерживать более высокое значение $P'_{лп пр}$. Для исследования получаемой при этом $P_{по пр}$ по зависимости на рис. 3, *а* для ряда значений $P'_{лп пр}$ получены значения мощности входного сигнала P_c в соседнем канале и соответствующие значения порога обнаружения h_p . Для приме-

ра выбрана отстройка сигнала от границы канала на $\Delta f_{-1} = 50$ МГц. При этом вероятность $P_{\text{лт пр}} = 2 \cdot 10^{-7}$ может быть получена при мощности сигнала в соседнем канале $P_c = -110$ дБ(Вт). Для той же отстройки вероятности $P_{\text{лт пр}} = 5 \cdot 10^{-7}$ соответствует мощность $P_c = -100,5$ дБ(Вт), вероятности $P'_{\text{лт пр}} = 1 \cdot 10^{-6}$ – мощность $P_c = -98,5$ дБ(Вт), вероятности $P'_{\text{лт пр}} = 1 \cdot 10^{-5}$ – мощность $P_c = -95,1$ дБ(Вт), вероятности $P'_{\text{лт пр}} = 1 \cdot 10^{-4}$ – мощность $P_c = -93$ дБ(Вт).

Рис. 5. Зависимость вероятности правильного обнаружения от мощности входного сигнала в основном канале при различных значениях порога обнаружения, соответствующего заданной вероятности ложной тревоги при соответствующей мощности сигнала в соседнем канале для фиксированной отстройки несущей сигнала от границы канала 50 МГц



Для приведенных значений на рис. 5 получена группа зависимостей вероятности правильного обнаружения от мощности входного сигнала в соседнем частотном канале приемника. Характеристики на рис. 5 позволяют оценить, насколько при повышении мощности сигнала в соседнем канале (на фиксированной частоте) повышение порога в исследуемом канале приводит к снижению чувствительности приемника.

При расчете группы зависимостей, представленных на рис. 5, принято во внимание отсутствие обнаружителей во второй ступени. То есть вероятность правильного обнаружения приемника в данном случае соответствует вероятности правильного обнаружения первой ступени.

Из рассмотренного численного эксперимента следует, что учет неоднозначности определения частоты приводит к существенному отклонению вероятности ложной тревоги от заданной при расчетах величины. Определяющее значение для вероятности ложной тревоги приемника $P'_{\text{лт пр}}$ имеет крутизна скатов АЧХ канальных фильтров. Зная порядок фильтра и соответственно приблизительное значение крутизны скатов его АЧХ, для заданного ДД входного сигнала по выражениям (1), (3), (6), (10), (15), (18) можно оценить полосу неоднозначности. Наличие сигнала в этой полосе приводит к ложному обнаружению в соседнем канале и, как следствие, к повышению $P'_{\text{лт пр}}$. Важно отметить возможность использования выражений (1), (3), (6), (10), (15), (18) для оценки $P'_{\text{лт пр}}$ в условиях сложной РЭО, когда за время наблюдения T_n могут быть приняты сигналы с различными несущими, в том числе совмещенные по времени. При попытке уменьшить неоднозначность путем повышения порога обнаружения снижаются вероятность правильного обнаружения сигнала и чувствительность приемника. В тех случаях, когда правильное определение частоты важнее высокой чувствительности, возможно повышение порога обнаружения в соответствии с уровнем входного сигнала. В заключение следует заметить, что более перспективным средством снижения неоднозначности определения частоты на стыках каналов матричного приемника может стать доработка схемы приемника [1, 7].

Литература

1. Подстригаев А.С. Неоднозначность определения частоты в матричном приемнике / А.С. Подстригаев, В.П. Лихачев // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2015. – Вып. 2. – 19 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb15/13/text.pdf>, свободный (дата обращения: 15.10.2015).
2. Куприянов А.И. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте / А.И. Куприянов, А.В. Сахаров. – М.: Вуз. книга, 2003. – 528 с.

3. Проектирование радиоприемных устройств: учеб. пособие для вузов / С.М. Клич, А.С. Кривенко, Г.Н. Носикова и др.; под ред. А.П. Сиверса. – М.: Сов. радио, 1976. – 488 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
5. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720 с.
6. Малорацкий Л.Г. Проектирование и расчет СВЧ-элементов на полосковых линиях / Л.Г. Малорацкий, Л.Р. Явич. – М.: Сов. радио, 1972. – 232 с.
7. Пат. 155553 РФ, МПК Н04В 15/06. Приемное устройство / А.И. Беззуб, А.С. Подстригаев; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Брянский электромеханический завод». – № 2014151261/08; заявл. 17.12.2014; опубл. 10.10.2015. Бюл. № 28. – 11 с.

Подстригаев Алексей Сергеевич

Аспирант каф. «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы»
Брянского государственного технического университета
Тел.: +7 (4832) 54-64-67
Эл. почта: ap0d@ya.ru

Лихачев Владимир Павлович

Д-р техн. наук, профессор Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж
Тел.: +7 (473) 244-78-55
Эл. почта: lvp_home@mail.ru

Ляпин Максим Владиславович

Студент 4-го курса каф. «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы»
Брянского государственного технического университета
Тел.: +7-920-862-91-88
Эл. почта: maksimlypin@ya.ru

Липаков Николай Евгеньевич

Ведущий инженер ордена Трудового Красного Знамени Всероссийского
научно-исследовательского института радиоаппаратуры, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 335-25-55, доб. 35-12
Эл. почта: lipakov_nikolai@mail.ru

Podstrigaev A.S., Likhachev V.P., Lyapin M.V., Lipakov N.E.

Numerical simulation of probabilistic characteristics of the matrix receiver subject to frequency determination ambiguity at joint of channels

Estimation method for the amount of frequency determination ambiguity emerging at joints of channels of matrix receiver is proposed. The results of numerical experiment on estimation and comparison of probabilistic characteristics of the matrix receiver subject to ambiguity and without it are described.

Keywords: ambiguity, matrix receiver, joint of channels, false-alarm probability, detection probability, frequency determination ambiguity, energy receiver, high interference signaling environment, erf-integral.