

**АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ДАЛЬНОМЕРНОГО И ИНФОРМАЦИОННОГО КАНАЛОВ СИСТЕМЫ  
ПРМГ ПО ЗАДАНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПРИЁМНЫХ  
УСТРОЙСТВ**

**Г. А. Ершов, В. А. Сеницын, Е. А. Сеницын, Л. Б. Фридман**

*АО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры»  
Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д. Ф. Устинова*

Предлагается алгоритм расчёта вероятностных характеристик обнаружения сигналов дальномерного и информационного радиоканалов системы ПРМГ по заданным характеристикам приёмных устройств (вероятностям правильного обнаружения и ложных тревог для случая приема одиночного импульса). Информационный канал встроен в дальномерный канал разрабатываемой в настоящее время в АО «ВНИИРА» новой посадочной радиомаячной группы с целью обмена данными между наземным и бортовым оборудованием при заходе самолётов на посадку путем использования многоимпульсных кодовых групп. Рассчитаны зависимости вероятностных характеристик обнаружения сигналов дальномерного и информационного радиоканалов от вероятностных характеристик приёмных устройств. Даны рекомендации по выбору вероятностных характеристик приёмных устройств для эффективного функционирования информационного радиоканала.

**Введение.** Основными показателями качества приёмных устройств систем радионавигации и радиолокации являются вероятностные характеристики, которые обычно задаются для случая приёма одиночного импульса. Однако при передаче сигналов дальномерного канала посадочных радиомаячных групп используются двухимпульсные коды. Разрабатываемая в настоящее время в АО «ВНИИРА» новая посадочная радиомаячная группа (ПРМГ) отличается встраиванием в дальномерный канал дополнительного информационного радиоканала для обмена данными между наземным и бортовым оборудованием при заходе самолётов на посадку путем использования многоимпульсных кодовых групп со сложной логикой декодирования. Для оценки эффективности дальномерного и информационного каналов требуется определить вероятности правильного обнаружения и ложных тревог для кодовых групп импульсов указанных каналов. Важным вопросом является также решение обратной задачи: по заданным вероятностным характеристикам дальномерного и информационного каналов определить требования к приёмным устройствам (вероятности правильного обнаружения и ложных тревог для случая приёма одиночного импульса).

В работе рассматривается алгоритм определения вероятностных характеристик обнаружения кодовых групп импульсов дальномерного и информационного каналов, а также способ определения требуемых вероятностных характеристик приёмных устройств. Приведены результаты использования рассмотренного алгоритма.

**Влияние некоррелированных с сигналом помех на вероятностные характеристики обнаружения полезных сигналов.** В данной работе рассматриваются одночастотные составные радиосигналы с пассивной паузой. Такие сигналы впервые были применены в радиолокационной технике. Ещё на заре радиолокации задачи борьбы с импульсными помехами, адресования команд, опознавания летательного аппарата и т.п. решались путём передачи сигнала, состоящего из нескольких радиоимпульсов равной длительности, с определёнными, известными в месте приема временными интервалами (задержками) между ними [1]. Такой способ кодирования сигналов получил в радиолокации название интервально-временного (или интервального). В настоящее время сигналы с интервально-временным кодированием (ИВК) применяются во вторичных радиолокационных системах УВД и радиотехнических системах ближней навигации [2, 3].

В основу данной работы положена интервальная трактовка сигналов. Существо её состоит в том, что каждому сигналу ставится в соответствие определённая последовательность натуральных чисел, выражающих величины интервалов между импульсами сигнала в некоторых условных дискретных единицах длительности.

При использовании сигналов с ИВК подавление помехой хотя бы одного импульса полезного сигнала, а также появление ложных импульсов на кодовых интервалах полезного сигнала приводит к ошибкам – пропускам и ложным тревогам.

Предположим, что помеха стационарна, не обладает последствием и статистически и структурно независима от полезного сигнала. Полезный сигнал состоит из  $n$  импульсов, а порог (логика) дешифратора равен  $k$ , т.е. для декодирования на вход дешифратора должны поступить, по крайней мере,  $k$  из  $n$  импульсов кода.

Вероятность пропуска, т.е. условная вероятность того, что при поступлении полезного сигнала будет подавлено помехой не менее  $n - k + 1$  импульсов, согласно [4]

$$P_{np} = \sum_{r=n-k+1}^n C_n^r p_{10}^r (1-p_{10})^{n-r}, \quad (1)$$

где  $p_{10}$  – вероятность подавления помехой одного импульса полезного сигнала, зависящая от конкретного вида помехи и её интенсивности.

Тогда вероятность правильного обнаружения полезного сигнала

$$P_{no} = (1 - P_{np}) = \left( 1 - \sum_{r=n-k+1}^n C_n^r p_{10}^r (1-p_{10})^{n-r} \right).$$

Вероятности ложных тревог определяются несколько сложнее. Используя подход, который был применён в [4] для определения помехоустойчивости дешифратора, можно установить, что для факта ложной тревоги, во-первых, на вход дешифратора должна поступить ложная комбинация из  $k$  или более импульсов помехи (необходимое условие) и, во-вторых, эта ложная комбинация должна быть декодирована (выявлена) данным дешифратором (достаточное условие).

Вероятность такого события [4]

$$P_{lm} = \sum_{r=k}^n C_n^r p_{01}^r (1-p_{01})^{n-r} p_{дек}(r), \quad (2)$$

где  $p_{01}$  – вероятность появления ложного импульса на входе дешифратора в интервале времени  $\delta\tau$ , также зависящая от вида и интенсивности помехи;

$p_{дек}(r) = \left( \frac{\tau_D}{\delta\tau} \right)^{r-1} \frac{(1+\mu)^r - 1}{\mu}$  –

вероятность декодирования дешифратором ложной  $r$ - импульсной комбинации;  $\tau_D$  – длительность импульса в дешифраторе;  $\mu = t_{сд} / \tau_D$ ;  $t_{сд}$  – период сдвига в дешифраторе.

Вероятность  $P_{lm}$ , определяемая в (2), относится к интервалу наблюдения  $\delta\tau$ .

**Вероятностные характеристики обнаружения сигналов дальномерного и информационного каналов системы ПРМГ.** Ретранслятор дальномера из состава ПРМГ принимает запросные сигналы дальности с борта самолета, совершающего заход на посадку, и излучает (с фиксированной задержкой) ответные сигналы дальности для измерения наклонной дальности на борту самолёта. Сигналы дальномерного канала ПРМГ (запросные и ответные сигналы дальности) представляют собой пару импульсов длительностью (1,25 ± 0,15) мкс на уровне 0,5 (рис. 1).

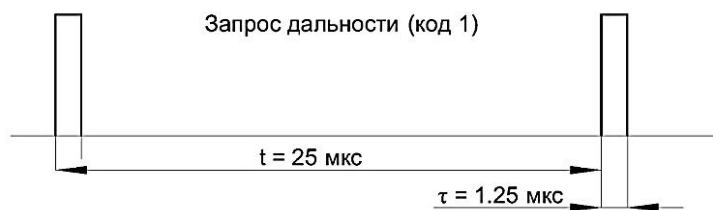


Рис. 1. Запрос дальности для первой кодовой группы

Кодовые группы запроса дальности:  
 код 1 –  $(25,0 \pm 0,15)$  мкс;  
 код 2 –  $(19,0 \pm 0,15)$  мкс;  
 код 3 –  $(21,0 \pm 0,15)$  мкс;  
 код 4 –  $(23,0 \pm 0,15)$  мкс

Кодовые группы ответа дальности:  
 код 1 –  $(14,0 \pm 0,15)$  мкс;  
 код 2 –  $(16,0 \pm 0,15)$  мкс;  
 код 3 –  $(18,0 \pm 0,15)$  мкс;  
 код 4 –  $(20,0 \pm 0,15)$  мкс.

Также аппаратура ретранслятора дальномера используется для организации информационного обмена «борт-земля» и «земля-борт». Для информационного обмена используются специальные информационные послылки ИП (рис. 2). Переносчиком информации является четырехимпульсный сигнал с ИВК (табл. 1). Метод передачи информации – старт-стопный.

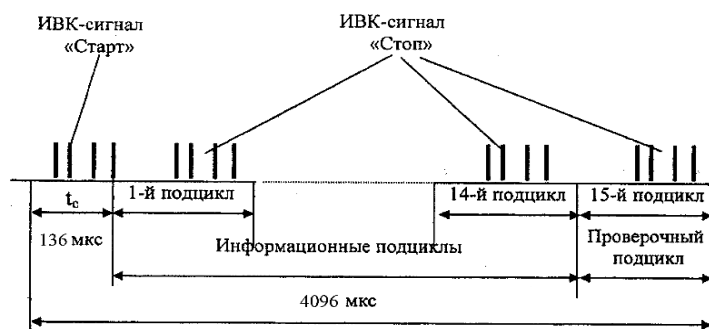


Рис. 2. Структура информационной послылки



Рис. 3. Структура подцикла информационной послылки

ИП по каналам связи «земля – борт» и «борт – земля» содержат:

- стартовую группу импульсов, представляющих собой четырехимпульсный интервально-временной код, используемый для синхронизации;
- 15 стоповых импульсных групп (стоповых 4-х импульсных ИВК-сигналов), используемых для передачи информации 32-битными подциклами.

Каждый подцикл ИП передается методом дискретной времяимпульсной модуляции на временной базе 264 мкс с числом позиций, равным 32 (рис. 3). Значение передаваемого двоичного числа в подцикле определяется порядковым номером позиции, которой соответствует временное положение стопового сигнала (считая по последнему импульсу кодовой группы).

Декодирование стартовой группы импульсов должно выполняться по логике дешифратора «4 из 4-х» ( $n = k = 4$ ); стоповых импульсных групп – по логике «4 из 4-х» или «3 из 4-х» ( $n = 4; k = 3$ ).

Таблица 1  
Коды стартовых и стоповых сигналов информационной посылки

Канал	Номер кода	Кодовые интервалы	
		Стартового сигнала	Стопового сигнала
«Земля-борт»	I	46-34-24	24-34-44
	II	48-36-26	26-36-46
	III	50-38-28	28-38-48
	IV	52-40-30	30-40-50
«Борт-земля»	I	55-43-35	35-45-55
	II	49-37-29	29-39-49
	III	51-39-31	31-41-51
	IV	53-41-33	33-43-53

Для запросных и ответных сигналов дальности (пара импульсов)  $n = k = 2$ . В этом случае нахождение вероятности правильного обнаружения является тривиальной задачей:  $P_{ПО} = (1 - p_{10})^2$ . Вероятность ложных тревог находится с использованием выражения (2), которое в данном случае упрощается до

$$P_{лм2} = p_{01}^2 p_{дек}(2) = p_{01}^2 \left( \frac{\tau_D}{\delta\tau} \right) \cdot \frac{(1 + \mu)^2 - 1}{\mu} = p_{01}^2 \left( \frac{\tau_D}{\delta\tau} \right) \cdot \frac{(1 + t_{CD}/\tau_D)^2 - 1}{t_{CD}/\tau_D}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что вероятность ложных тревог при обнаружении кодовой группы (пары импульсов) дальномерного канала пропорциональна квадрату вероятности ложных тревог при обнаружении одиночного импульса.

На рис. 4 приведена зависимость  $P_{лм2}(p_{01})$  при  $\tau_D = 0,75$  мкс,  $\delta\tau = 1$  мкс,  $t_{CD} = 0,25$  мкс. При других параметрах дешифратора зависимость будет отличаться от представленной на рис. 4.

Очевидно, что для ИП «земля-борт» и «борт-земля» вероятность ложных тревог пренебрежимо мала, т.к. при их передаче используется большое количество импульсов и проверочный подцикл (контрольная сумма). В то же время, нахождение вероятности правильного обнаружения ИП интуитивным путём затруднительно, поэтому воспользуемся (1).

Рассмотрим сначала вариант декодирования стоповых импульсных групп ИП по логике «4 из 4-х» ( $n = k = 4$ ).

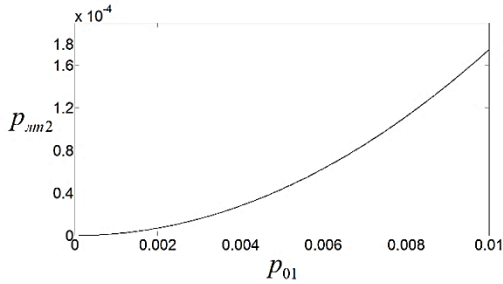


Рис. 4. Вероятность ложных тревог в дальномерном канале

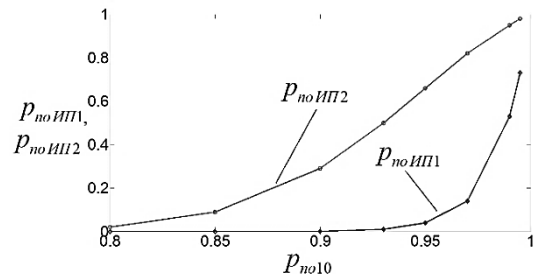


Рис. 5. Вероятность правильного обнаружения информационных посылок

Согласно (1),

$$P_{np\ cтaрт} = P_{np\ cтoн1} = \sum_{r=1}^4 C_4^r p_{10}^r (1-p_{10})^{4-r}. \quad (4)$$

Декодирование стартовой и каждой из 15 стоповых групп импульсов выполняется независимо. В связи с этим вероятность правильного обнаружения ИП в случае декодирования стоповых импульсных групп ИП по логике «4 из 4-х», с учётом (4), будет иметь вид

$$P_{ноИП1} = (1 - P_{np\ cтaрт}) \cdot (1 - P_{np\ cтoн1})^{15} = (1 - P_{np\ cтaрт})^{16} = \left[ 1 - \sum_{r=1}^4 C_4^r p_{10}^r (1-p_{10})^{4-r} \right]^{16}$$

Вероятность приёма одного импульса полезного сигнала выразим через  $p_{10}$ :

$$p_{но10} = 1 - p_{10}.$$

Как следует из рис. 5, в случае декодирования стоповых импульсных групп ИП по логике «4 из 4-х»  $P_{ноИП1}$  принимает приемлемые значения ( $> 0,7$ ) только при очень больших значениях  $p_{но10}$  ( $\geq 0,995$ ). Поэтому интерес представляет вариант декодирования стоповых импульсных групп ИП по логике «3 из 4-х» ( $n = 4; k = 3$ ). В этом случае, согласно (1)

$$P_{np\ cтoн2} = \sum_{r=2}^4 C_4^r p_{10}^r (1-p_{10})^{4-r}. \quad (5)$$

Тогда вероятность правильного обнаружения ИП в случае декодирования стоповых импульсных групп ИП по логике «3 из 4-х», с учётом (4) и (5), будет иметь вид

$$P_{ноИП2} = (1 - P_{np\ cтaрт}) \cdot (1 - P_{np\ cтoн2})^{15} = \left( 1 - \sum_{r=1}^4 C_4^r p_{10}^r (1-p_{10})^{4-r} \right) \left( 1 - \sum_{r=2}^4 C_4^r p_{10}^r (1-p_{10})^{4-r} \right)^{15}. \quad (6)$$

Как следует из рис. 4, в случае декодирования стоповых импульсных групп ИП по логике «3 из 4-х» вероятность правильного обнаружения значительно выше, чем при декодировании по логике «4 из 4-х» (при равных значениях  $p_{но10}$ ). При декодировании стоповых импульсных групп ИП по логике «3 из 4-х»  $P_{ноИП2} > 0,7$  при  $p_{но10} > 0,95$ .

Таким образом, при декодировании стоповых импульсных групп ИП целесообразно применять логику дешифратора «3 из 4-х» (а не «4 из 4-х»). При этом эффективное использова-

ние информационного канала будет возможно при достаточно высоких вероятностных характеристиках приёмных устройств ( $P_{no10} > 0,95$ ).

Обратная задача (определение  $P_{01}$  и  $P_{10}$  по заданным вероятностным характеристикам дальномерного и информационного каналов) решается следующим образом. В (3) и (6) подставляют соответственно  $P_{01}$  и  $P_{10}$  и находят  $P_{лм2}$  и  $P_{ноИП2}$ . Затем подбирают (путём последовательного приближения) значения  $P_{01}$  и  $P_{10}$ , при которых  $P_{лм2}$  и  $P_{ноИП2}$  совпадут (с заданной точностью) с требуемыми значениями. Указанная процедура подбора может выполняться автоматически (при помощи ПК, в случае использования программного кода, реализующего подбор значений  $P_{лм2}$  и  $P_{ноИП2}$ ).

#### Библиографический список

1. Roberts A. (ed.) Radar beacons. Mc-Graw-Hill. NY & Lond., 1947 (MIT series).
2. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2004.
3. Бакулев П. А., Сосновский А. А. Радионавигационные системы: Учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2005.
4. Глобус И. А. Двоичное кодирование в асинхронных системах. М.: Связь, 1972.

УДК 621.396

### ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ДАЛЬНОМЕРНОГО И ИНФОРМАЦИОННОГО РАДИОКАНАЛОВ СИСТЕМЫ ПРМГ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРИСИСТЕМНЫХ ПОМЕХ И НАЛИЧИИ ПЕРЕОТРАЖЕНИЙ ОТМЕСТНЫХ ПРЕДМЕТОВ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Г. А. Ершов, В. А. Сеницын, Е. А. Сеницын, Л. Б. Фридман

*АО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры»  
Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д. Ф. Устинова*

Выполняется оценка взаимного влияния дальномерного и информационного радиоканалов системы ПРМГ, работающих на одной несущей частоте, при наличии переотражений сигналов от местных предметов и подстилающей поверхности. Информационный канал встроен в дальномерный канал разрабатываемой в настоящее время в АО «ВНИИРА» новой посадочной радиомаячной группы с целью обмена данными между наземным и бортовым оборудованием при заходе самолётов на посадку. Предлагается формат сигналов, передаваемых по информационному каналу, обеспечивающий повышенную защищённость от внутрисистемных помех при наличии или отсутствии искажений, вызванных переотражениями от местных предметов и земной поверхности.

**Введение.** Одной из отличительных особенностей новой посадочной радиомаячной группы (ПРМГ), разрабатываемой в настоящее время в АО «ВНИИРА», является встраивание в дальномерный радиоканал информационного радиоканала для обеспечения обмена данными между наземным и бортовым оборудованием при заходе самолётов на посадку.

В дальномерном и информационном каналах используются одночастотные составные радиосигналы с пассивной паузой, состоящие из нескольких радиоимпульсов равной длительности. Временные интервалы (задержки) между радиоимпульсами образуют коды, а способ