

Оценка эффективности функционирования систем и средств управления космическими аппаратами в условиях радиопомех

И. А. Козин, В. С. Куликов, С. Н. Святкин
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

Аннотация. Рассмотрены оценки технической эффективности радиоэлектронных систем управления космическими аппаратами через оценку их помехозащищенности. Приведены результаты исследования помехоустойчивости радиоэлектронных систем, использующих синтезированные радиоприемные устройства с компенсацией внутрисистемных структурных помех.

Ключевые слова: радиоэлектронная система; помехозащищенность; эффективность; вероятность ошибки

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные радиоэлектронные системы (РЭС) управления космическими аппаратами (КА) в виду своей структурной и функциональной сложности относятся к классу сложных технических систем. Для таких систем важным является вопрос оценки и повышения эффективности их применения. Рассмотрим оценки эффективности функционирования радиоэлектронных систем управления КА и измерений только в аспекте их технической эффективности. Техническая эффективность – это комплексная характеристика технических возможностей и приспособленности системы к эксплуатации в различных условиях [1]. Для того чтобы корректно определить техническую эффективность таких сложных систем как радиоэлектронные системы управления КА, необходимо выбрать параметры или показатели которые необходимо оценить, их оценки в свою очередь позволят оценить эффективность уже всей РЭС управления КА. Выделим два основных направления, влияющих на техническую эффективность РЭС управления КА [2]. Первое направление – это показатели качества функционирования. Эти показатели оценивают пропускную способность, достоверность передачи информации, сложность структурного построения. Для РЭС управления КА наиболее важной характеристикой является, прежде всего, достоверность передачи информации по радиоканалу. В этом смысле техническая эффективность тесно связана с целевой эффективностью, именно поэтому достоверность передачи информации имеет более высокий приоритет по сравнению с остальными характеристиками. Достоверность передачи информации РЭС управления КА характеризуется помехоустойчивостью. Второе направление – это эксплуатационно-технические характеристики (ЭТХ).

Показателями эксплуатационных свойств РЭС являются количественные значения соответствующих ЭТХ.

Рассмотрим оценку эффективности РЭС управления КА через оценку ее помехозащищенности. В самом общем случае под помехозащищенностью РЭС понимают их способность функционировать с заданным качеством в условиях радиопомех.

II. ПОДХОД К КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ

Количественной оценкой помехозащищенности радиоэлектронной системы может являться такой показатель качества, который позволяет численно охарактеризовать степень выполнения радиоэлектронной системой основных задач по ее предназначению. Так как любая РЭС в большинстве случаев является информационной системой и ее основное предназначение – это обнаружение (различение, оценивание) радиосигналов на фоне действующих в радиоканале помех, то помехозащищенность целесообразно оценивать вероятностью правильного извлечения полезной информации из радиосигнала в условиях воздействия радиопомех [3].

В конечном итоге показатель качества, определяющий помехозащищенность радиоэлектронной системы, зависит от конкретных целей и задач решаемых РЭС. Например, для систем радиоперехвата и связи, наиболее подходящим показателем качества помехозащищенности является усредненная вероятность ошибки различения сигналов. Для систем радионавигации, телеуправления и радиолокации, наиболее подходящим показателем помехозащищенности является вероятность правильного обнаружения сигнала для выбранной вероятности ложных тревог, а также средний квадрат ошибок возникающих при оценивании параметров радиосигналов.

В ряде случаев помехозащищенность оценивают энергетическим критерием – отношением средней мощности сигнала к средней мощности помехи (отношением энергии сигнала к дисперсии помехи). Иначе говоря, помехозащищенность оценивается по критерию максимума отношения сигнал-помеха. Использование критерия максимума отношения сигнал-помеха при больших отношениях сигнал-помеха является традиционным, но характеризуется недостатком, такой

критерий является универсальным и не отражает специфики и задач функционирования радиоэлектронных систем. Но в общем случае нельзя утверждать, что максимизация отношения сигнал-помеха обеспечивает извлечение наибольшего количества информации о полезном сигнале.

Поскольку критерий максимума отношения сигнал-помеха имеет ограничения на применение, то в настоящее время предложена и используется концепция вероятностной оценки уровня помехозащищенности.

Общее выражение для оценки помехозащищенности РЭС в условиях действия преднамеренно созданных помех имеет вид [3]:

$$P_{ПЗ} = (1 - P_{ПД}) P_{ПУ0} + P_{ПД} P_{ПУ1},$$

где $P_{ПД}$ – вероятность воздействия на рассматриваемую РЭС специально организованных радиопомех;

$P_{ПУ1}$, $P_{ПУ0}$ – вероятности успеха в решении задач РЭС рассчитанные при условии, что в радиоканале воздействуют искусственно организованные помехи и естественные шумы или только естественные шумы соответственно.

Вероятность $P_{ПД}$ характеризует скрытность работы РЭС от системы постановки помех, а $P_{ПУ1}$ и $P_{ПУ0}$ представляют собой количественные показатели помехоустойчивости РЭС при наличии и отсутствии искусственно созданных радиопомех соответственно.

Смысл вероятностей $P_{ПУ1}$ и $P_{ПУ0}$ зависит от конкретного предназначения радиоэлектронной системы. Например, для рассматриваемой РЭС управления КА $P_{ПУ1}$ и $P_{ПУ0}$ имеют смысл вероятностей правильного приёма сигналов при наличии и отсутствии помех РЭП соответственно.

Наравне с основными показателями помехоустойчивости радиоэлектронных систем, в ряде случаев используются так называемые частные показатели. Количество таких частных показателей, которые косвенно или непосредственно связаны с основным показателем, в большинстве случаев бывает не мало. Например, в некоторых случаях при воздействии радиопомех проявляются только случайные аддитивные ошибки передачи команд, измерения координат и т. д. Для определения вероятностей $P_{ПУ1}$ и $P_{ПУ0}$, в случае нормального закона распределения ошибок возникающих из-за воздействия помех, достаточно вычисления частных показателей помехоустойчивости – математических ожиданий и дисперсии. В ряде случаев помимо аддитивных помех в радиоканале проявляются и мультипликативные помехи. В условиях появления мультипликативных ошибок необходимо определять их условные дисперсии и математические ожидания. Условные дисперсии и математические ожидания при этом вычисляются для каждого фиксированного значения

передаваемой команды управления, измеряемой координаты и т. п.

В рассматриваемой системе возможности РЭП не определены. Поэтому в дальнейшем будем считать, что наряду с полезными сигналами на РЭС воздействуют и организованные (искусственные), и естественные радиопомехи, при этом будем полагать $P_{ПД} = 1$.

Для цифровых систем передачи информации величину $P_{ПУ1}$ можно представить в виде

$$P_{ПУ1} = 1 - (1 - P_0)^N,$$

где P_0 – вероятность ошибки приёма одного бита информации (вероятность ошибки на бит), N – число бит в передаваемом сообщении.

Для симметричного канала передачи информации космической радиолинии вероятность P_0 является традиционным показателем помехоустойчивости. Кроме того, для двоичного канала вероятность на бит совпадает с вероятностью ошибки различения сигналов.

Потому в дальнейшем мы ограничимся анализом помехоустойчивости, которая для рассматриваемой РЭС управления КА, как системы передачи цифровой информации, оценивается вероятностью ошибки на бит.

В самом общем случае помехоустойчивость РЭС управления КА определяется системой сигналов (их корреляционными свойствами) передающих информацию, энергетическим потенциалом и видом схем выделения этих битов. Помехоустойчивость РЭС управления КА в общем случае и с учетом всех действующих в радиоканале помех определяется энергетическим потенциалом радиолинии, структурой сигнала и способа обработки сигнала в радиоприемнике. В современных и перспективных радиоэлектронных системах космических комплексов широко используются сложные сигналы или, по-другому, сигналы с расширением спектра. В качестве основного класса сложных сигналов существующих и перспективных систем управления КА будем рассматривать сложные фазоманипулированные сигналы с расширением спектра на основе линейных или нелинейных ПСП [4]. Потенциальная помехоустойчивость данного класса сигналов примерно одинакова для различных видов ПСП и определяется величиной их базы [5]. В качестве схемы различения сложных широкополосных сигналов будем использовать схему с компенсацией структурных помех. Данная схема кроме ветвей выделения информационных символов, содержит К-каналов выделения структурных помех и устройство компенсации в каждой ветви при условии наличия априорных данных о параметрах структурных помех или оперативно их оценивать. Выбор такой схемы выделения информационного сигнала не случаен, поскольку задавая различные варианты коэффициента компенсации структурных помех, возможно моделировать самые разные помеховые обстановки и соответственно анализировать помехоустойчивость информационных радиоканалов.

Рассмотрим в качестве основного показателя помехоустойчивости радиоканалов управления и информационного обмена с КА вероятность ошибки приема информационного бита. Полагая, что случайная составляющая на выходе устройств обработки сигнала определяется воздействием белого гауссовского шума (шумовой помехой) вероятность ошибки приема информационного бита рассчитывается на основе вычисления интеграла вероятности (функции ошибки). В том случае если информационные символы извлекаются из аддитивной смеси сигнала, белого гауссовского шума и искусственных помех, вычисления вероятности ошибки приема информационного бита заключается в аппроксимации случайной составляющей на выходе устройства обработки, обусловленной белым гауссовским шумом и искусственными помехами известной структуры, случайным нормальным процессом с соответствующими параметрами [6].

С учетом всех необходимых математических преобразований окончательное выражение для оценки вероятности ошибочного приема информационного символа в приемнике с компенсацией помех примет вид:

$$P_0 = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \Phi_0 \left[\frac{\sqrt{2}h_0}{1 + \rho^2 \sqrt{\sum_{k=1}^K \frac{K_k^2}{h_k^2}}} \right] \right\},$$

где $h_0 = \frac{E_0}{N_0}$ – отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности шумовой помехи (отношение сигнал/шум); $h_k = \frac{E_0}{E_k}$ – отношение энергии сигнала к энергии структурной помехи (отношение сигнал/помеха);

$\Phi_0(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ – табулированная функция Крампа.

Компенсация структурной помехи учитывается коэффициентами K_k , уменьшающими в соответствующее число раз отношения сигнал/помеха h_k , $k=1, \dots, K$.

При отсутствии структурных помех, что соответствует идеальным корреляционным свойствам ансамбля используемых сигналов $h_k^{-1} = 0$, $k=1, \dots, K$, и при $\rho = 0$, выражение для оценки вероятности ошибочного приема информационного символа сводится к известному выражению для вероятности ошибочного приема информационного символа в системе с противоположными сигналами в условиях белого гауссовского шума.

При выполнении условий о статистических свойствах смеси сигнала, шума и помехи, действующих на входе корреляционных приемников и при отсутствии компенсации внутрисистемных структурных помех $K_k=1$,

$k=1, \dots, K$, выражение оценки вероятности ошибочного приема информационного символа характеризует помехоустойчивость простого корреляционного приемника работающего в условиях воздействия шумовых и структурных помех.

Особенностью учета воздействия нескольких структурных помех или остаточных ошибок их компенсации является зависимость величины P_0 от геометрической суммы отношений сигнал/помеха в знаменателе аргумента функции Крампа. В соответствии с этим влияние одной мощной структурной помехи всегда оказывается сильнее, чем нескольких структурных помех, имеющих такую же суммарную мощность. При $K=1$ и $K_k=1$ полученное выражение для оценки вероятности ошибочного приема информационного символа преобразуется к выражению, являющемуся частным случаем рассмотренному. Оно описано в работе [6] и используется для случая рассмотрения приема сложных сигналов с фазовой манипуляцией в условиях воздействия шума и одной структурной помехи.

III. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КА

Проведены исследования помехоустойчивости перспективных РЭС управления группировками малых КА реализующих кодовое разделение каналов и использующих синтезированные радиоприемные устройства с компенсацией внутрисистемных структурных помех. Исследования проводились для различных условий функционирования спутниковых радиоканалов. В проводимых вычислениях полагалось, что коэффициент корреляции равен 0,06. Это соответствует уровню нормированной взаимно корреляционной функции фазоманипулированного сигнала, основанного на псевдослучайных последовательностях (ПСП) с базой сигнала равной 128 [7]. В ходе исследований полагалось, что осуществляется полная или частичная компенсация действующих внутрисистемных структурных помех, степень которой задавалась величиной коэффициентов компенсации K_k .

На рис. 1 представлены результаты расчетов вероятности ошибочного приема информационного символа P_0 в зависимости от отношения сигнал/шум h_0 для случая, когда полезные сигнал и структурные помехи имеют одинаковую амплитуду при коэффициенте компенсации внутрисистемных помех $K_k=0,8$. Рассматривались условия, когда на входе приемника действует от одной до восьми структурных помех. Кривая 1 соответствует отсутствию внутрисистемных структурных помех или их полной компенсации, кривая 2 – действию на входе приемника одной внутрисистемных структурных помех, кривая 3 – действию суммы из 4 внутрисистемных структурных помех, кривая 4 – действию суммы из 8 внутрисистемных структурных помех.

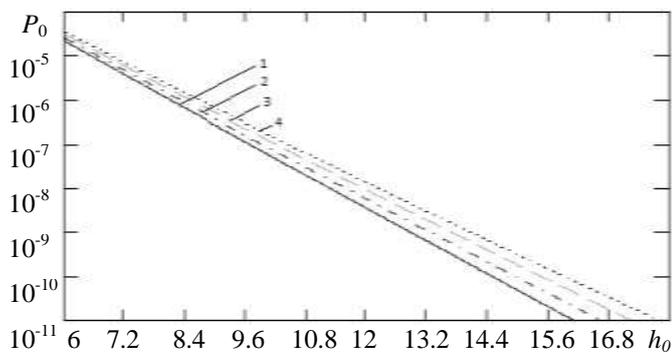


Рис. 1. Результаты расчетов вероятности ошибочного приема информационного символа P_0 в зависимости от отношения сигнал/шум h_0 при $K_k=0,8$ (полезные сигнал и структурные помехи имеют одинаковую амплитуду)

На рис. 2 представлены результаты оценки вероятности ошибочного приема информационных символов P_0 в зависимости от отношения энергии сигнала к спектральной плотности мощности шумовой помехи h_0 в условиях воздействия одной внутрисистемной структурной помехи различной мощности ($K=1$) при уровне компенсации помехи $K_k=0,3$. Кривые 1 соответствуют отсутствию структурной помехи или ее полной компенсации ($h_1^{-1}=0$), кривая 2 – отношению сигнал/помеха $h_1=1$, кривая 3 – отношению сигнал/помеха $h_1=0,25$, кривая 4 – отношению сигнал/помеха $h_1=0,125$, кривые 5 – отсутствию компенсации.

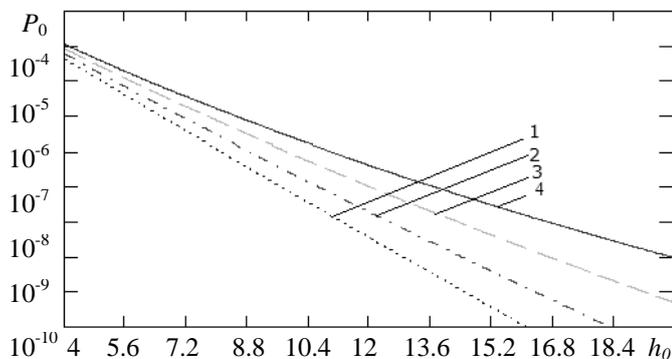


Рис. 2. Результаты расчетов вероятности ошибочного приема информационного символа P_0 в зависимости от отношения сигнал/шум h_0 при $K_k=0,3$ (воздействует одной внутрисистемная структурная помеха различной мощности)

Анализ данных приведенных на рис. 1 показывает, что при значении коэффициентов компенсации $K_k=0,8$ в случаи воздействия 8 помеховых сигналов, мешающих приему полезного сигнала с уровнем отношения энергии сигнала к спектральной плотности мощности шумовой помехи 8 дБ вероятность ошибочного приема информационного символа увеличивается по отношению к вероятности ошибочного приема информационного символа в условиях отсутствия структурных помех примерно в 11 раз. Для компенсации влияния внутрисистемных помех (то есть по сравнению со случаем отсутствия помех) требуется увеличить отношение

сигнал/шум h_0 примерно на 2 дБ. Из графиков видно, что характер зависимости величины P_0 от числа действующих помех остается таким же, как и для обычного корреляционного приемника [6], но уже при коэффициенте компенсации $K_k=0,8$ величина P_0 заметно уменьшается.

Анализ данных, приведенных на рис. 2, показывает, что в данном случае, наихудшем с точки зрения помехоустойчивости (действие одной мощной структурной помехи) увеличение уровня помехи или, что тоже самое, уменьшение отношения сигнал/помеха h_1 в 4 раза приводит при отношении сигнал-шум 10 дБ и при $K_1=0,8$ к увеличению P_0 примерно на 2 порядка.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во всех рассмотренных случаях с ростом отношения сигнал-шум влияние коэффициента компенсации на величину вероятности ошибочного приема информационного символа увеличивается, особенно в области значений коэффициента компенсации, близких к единице. Это означает, что даже при небольшой степени компенсации и наличии остаточных составляющих действующих структурных помех можно ожидать заметного повышения помехоустойчивости выделения информационных символов. В том случае если на входе приемного устройства действует несколько структурных помех с равными мощностями, то вероятность ошибочного приема информационного символа становится менее зависима от величины коэффициента компенсации по сравнению с тем как она зависит от величины коэффициента компенсации при воздействии помех с неравномерным распределением мощностей. С ростом отношения сигнал/шум вероятность ошибочного приема информационного символа становится более зависимой от значения коэффициента компенсации. Это происходит потому, что с увеличением отношения сигнал/шум степень влияния шумовой помехи становится меньше, а степень воздействия структурных помех при этом растет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бельх А.А. Проблема повышения эффективности информационных систем в современных условиях // Научный журнал КубГАУ. 2010. №58. С.1-23.
- [2] Галантерник Ю.М., Гориш А.В., Калинин А.Ф. Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами. М.: МГУЛ, 2003. 200 с.
- [3] Максимов М.В., Бобнев М.П., Кривицкий Б.Х. и др. Защита от радиопомех / Под ред. М.В. Максимова М.:Сов. Радио. 1976, 496 с.
- [4] Вознюк В.В., Куценко Е.В. Помехоустойчивость систем радиосвязи с двоичными фазоманипулированными широкополосными сигналами при воздействии ретранслированных компенсационных помех типа прямой инверсии сигнала // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2018. № 660. С. 44-56.
- [5] Замарин А.И. Сложные сигналы, принципы применения и обработки. Л.: ВИКИ имени А.Ф.Можайского, 1980. 192 с.
- [6] Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов. М.: Радио, 1970. 377 с.
- [7] Степанов М.Г., Харченко А.В., Гарагуля А.С., Козинев И.А. Прием сигналов с расширенным спектром при воздействии коррелированных помех // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2011. № 633. С. 111-115.