

Пути повышения помехоустойчивости радиоэлектронных систем управления космическими аппаратами

И. А. Козин, С. Д. Засеков, Н. Г. Калинин
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

Аннотация. Рассмотрен ряд методов, которые позволяют, в условиях воздействия мощных преднамеренных помех, получить больший выигрыш в показателях эффективности радиоэлектронных систем космических комплексов по сравнению с тем, который достигается только за счет использования сложных сигналов. Показаны возможности снижения влияния помех на качество приёма информации путём их компенсации с использованием цифровой обработки сигналов на основе ортогональных преобразований.

Ключевые слова: помехоустойчивость, радиоэлектронная система, сложные сигналы

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные радиоэлектронные системы (РЭС) управления космическими аппаратами (КА) представляют собой совмещенные (многофункциональные) РЭС, аппаратно или на сигнальном уровне объединяющие информационные и измерительные функциональные каналы контура управления КА. РЭС управления КА, как сложные многофункциональные РЭС, предназначены для комплексного решения задач управления КА и не имеют аналогов среди средств радиосвязи и радиоуправления.

Под помехоустойчивостью радиосистемы понимают её способность противостоять мешающему действию помех. Помехоустойчивость в заданных условиях оценивается вероятностью ошибки. РЭС, обеспечивающие управление КА, относятся к цифровым системам передачи информации, для которых основным показателем помехоустойчивости является вероятность появления ошибочного бита при приёме сигнала [1–3]. Этот показатель является исходным для определения показателей качества функционирования РЭС более высокого уровня (вероятностей ошибочного приёма сообщений, выполнения сеанса управления и т. п.). При этом одной из важнейших метрик качества в системах цифровой передачи информации является график, демонстрирующий зависимость вероятности ошибочного приёма бита передаваемой информации P_0 от отношения энергии этого бита к спектральной плотности средней мощности шума E_b / N_0 . Указанную метрику мы и будем использовать в дальнейшем для анализа эффективности применения тех или иных методов повышения помехоустойчивости.

Рассмотрим ряд методов, которые позволяют, в условиях воздействия мощных помех, получить больший выигрыш в показателях эффективности радиоэлектронных систем космических комплексов.

II. ОСНОВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

Основными путями повышения помехоустойчивости являются [1–3]:

- применение оптимальной обработки сигналов;
- использование сложных сигналов;
- компенсация помех;
- помехоустойчивое (канальное) кодирование;
- применение обратной связи.

Все указанные пути повышения помехоустойчивости используются в современных и перспективных радиоэлектронных системах управления КА.

Кроме перечисленных выше основных путей повышения помехоустойчивости в практике создания РЭС также применяются специальные методы повышения помехоустойчивости [1]:

- использование оптимальной системы сигналов;
- прием сигналов в целом;
- повторение сообщений и т.п.

В современных и перспективных радиоэлектронных системах космических комплексов широко используются сложные сигналы или, по-другому, сигналы с расширением спектра. Основная суть метода расширения спектра передаваемых сигналов состоит в том, что при расширении спектра сигнала передача осуществляется таким образом, чтобы сигнал занимал полосу частот намного шире той полосы частот, которая минимально необходима для осуществления качественной передачи. Расширение полосы частот передаваемого сигнала на практике реализуется с помощью специального кодирования. При таком кодировании используемый код не должен быть зависим от той информации, которая передается. На приемной стороне реализуется процедура сжатия полосы частот сигнала до исходного уровня. Эта

процедура реализуется аналогичным кодированием, которое синхронизировано с кодированием в передатчике.

РЭС решающие задачу передачи информации, в которых реализованы сигналы с расширением спектра, имеют существенные достоинства по сравнению с РЭС, реализующими сигналы без расширения спектра [4]:

- способностью противостоять преднамеренным и непреднамеренным помехам;
- высокой энергетической скрытностью;
- возможностью обеспечения множественного доступа на основе кодового разделения;
- возможностью измерения времени прихода сигналов с большой точностью и высоким разрешением;
- способностью подавления эффектов многолучевого распространения и др.

Методы реализующие процедуру расширения спектра передаваемого сигнала, как правило, основываются на манипуляции одним из параметров сигнала. Например амплитуды сигнала, его фазы и частоты, задержки сигнала или изменения его временного местоположения в соответствии с специальным алгоритмом кодирования, которое реализуется на основе алгоритмов формирования псевдослучайных последовательностей.

В современных РЭС управления КА, а также РЭС решающих задачи передачи информации, связи, радионавигации и локации, к основным методам позволяющими расширить спектр передаваемого сигнала относятся [5]:

- метод непосредственной модуляции несущей псевдослучайной последовательностью (ПСП);
- метод псевдо-временной импульсной модуляции;
- метод псевдослучайной перестройки рабочей частоты;
- метод совместного использования различных методов расширения спектра (например, метода непосредственной модуляции несущей псевдослучайной последовательностью и метода псевдослучайной перестройки рабочей частоты; метода псевдослучайной перестройки рабочей частоты и метода псевдо-временной импульсной модуляции и другие комбинации методов).

III. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ СО СЛОЖНЫМИ СИГНАЛАМИ

Для современных и перспективных радиоэлектронных систем решающих задачи управления КА наибольший интерес составляют методы расширения спектра сигнала основанные на непосредственной модуляции несущей псевдослучайной последовательностью. Это обусловлено спецификой функционирования и применения такого класса РЭС.

При реализации метода расширения спектра сигнала путем непосредственной модуляции несущей ПСП осуществляется непосредственная модуляция несущей с использованием двоичной псевдослучайной последовательности. В результате образуются так называемые фазоманипулированные шумоподобные сигналы, которые иногда называют широкополосными сигналами. Широкополосные сигналы образуются путем мультипликативного сложения несущей сигнала и псевдослучайной последовательности с тактовой частотой, существенно большей ширины полосы частот информационного сигнала.

В дальнейшем остановимся только на сигналах со спектром, расширение которого достигнуто с использованием ПСП с длительностью одного элемента кода ПСП $\tau_{\text{сн}}$, которое в целое число раз меньше длительности информационного символа T_b .

Если длительность информационного символа $T_b = L\tau_{\text{сн}}$, то ширина спектра сигнала $s(t)$ в основной полосе частот в L раз больше полосы частот информационного символа (бита информации). L – это целое число, показывающее сколько кодовых элементов псевдослучайной последовательности помещается в один информационный символ. Наиболее часто реализуемые в РЭС ПСП имеют период равный $L = T_b / \tau_{\text{сн}}$. В РЭС управления КА и в других РЭС могут быть применены и другие псевдослучайные последовательности с периодами меньшими или большими значения L [6].

Из всех указанных выше потенциальных областей применения систем со сложными сигналами, наибольшую ценность представляет возможность противодействовать как преднамеренным, так и непреднамеренным помехам. Естественный выигрыш в обработке сигналов, обусловленный применением сигналов с расширением спектра, во многих случаях позволяет получить достаточную степень подавления помех в системах передачи информации.

Вероятность ошибочного приема бита информации P_0 при передаче двоичных фазоманипулированных противоположных сигналов с когерентной демодуляцией (без реализации процедуры канального помехоустойчивого кодирования) равна [4]

$$P_0 = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad (1)$$

где $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$ – гауссов интеграл

ошибок; $E_b = P_b T_b$ – энергия сигнала (бита); T_b – длительность сигнала; N_0 – спектральная плотность средней мощности белого гауссова шума.

Будем полагать, что для передачи используется сложный сигнал с базой (коэффициентом расширения спектра)

$$B = \Delta W_s T_b, \quad (2)$$

где ΔW_s – полоса частот, занимаемая сигналом.

Рассмотрим создание помех, которые могут быть смоделированы с помощью стационарного гауссова шума с нулевым средним и равномерным распределением спектральной плотности средней мощности J_0 определяемой по формуле

$$J_0 = P_j / \Delta f_j \quad (3)$$

где Δf_j – ширина полосы Диапазона частот в котором создаются помехи.

Из-за наличия искусственно созданных помеховых сигналов полная спектральная плотность мощности в формуле (1) возрастает от значений спектральной плотности средней мощности белого гауссова шума N_0 до его суммы со спектральной плотностью средней мощности $N_0 + J_0$. Таким образом, в когерентной системе передачи информации средняя вероятность ошибки на бит передаваемой информации при наличии шума и помехи равна

$$P_0 = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + J_0}} \right).$$

В предположении, что полоса частот, занимаемая помехой, равна полосе частот сигнала $\Delta f_j = \Delta W_s$, а также с принимая во внимание выражения (2) и (3), можно получить выражение для расчета вероятности ошибки на бит передаваемой информации:

$$P_0 = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + \frac{1}{B} \frac{P_J}{P_b} E_b}} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{2 \frac{E_b}{N_0}}{1 + \frac{1}{B} \frac{P_J}{P_b} \frac{E_b}{N_0}}} \right).$$

При выбранном фиксированном отношении мощности сигнала к мощности шума всегда будет существовать неснижаемая вероятность возникновения ошибки, обусловленной наличием помех в радиоканале. Уменьшить эту ошибку возможно только при помощи увеличения базы сигнал (увеличении коэффициента расширения спектра сигнала).

Величина неснижаемой вероятности возникновения ошибки определяется по формуле [7]

$$P_{0\min} = \lim_{\frac{E_S}{N_0} \rightarrow \infty} P_0 = \lim_{\frac{E_S}{N_0} \rightarrow \infty} Q \left(\sqrt{\frac{2}{\frac{1}{E_S/N_0} + \frac{1}{B P_S}}} \right) = Q \left(\sqrt{B \frac{2P_S}{P_J}} \right)$$

Очевидно, что в ряде случаев помеховые сигналы могут иметь такую большую мощность, что даже при тех преимуществах, которые дает применение сложных сигналов, радиосвязь полностью нарушается.

Например, при фиксированном значении базы сигнала $B=4095$ для различных значений P_j / P_b значительная интенсивность помех ($P_j / P_b > 30\text{дБ}$) приводит к недопустимо низкому для РЭС космических комплексов значению вероятности ошибки $P_0 > 10^{-3}$.

В рассмотренных выше условиях воздействия мощных помех можно применить ряд методов, которые позволят получить больший выигрыш в показателях эффективности РЭС космических комплексов по сравнению с тем, который достигается только за счет использования сложных сигналов. Эти методы обычно включают в себя ряд дополнительных видов обработки сигналов.

В настоящее время для борьбы с мощными помехами все основные направления можно свести к двум методам:

- первый метод включает в себя всевозможные подходы, предотвращающие непосредственное воздействие помехи на радиоприемник, позволяющие защитить его от перегрузок, которые приводят к возникновению нелинейных эффектов. Нелинейные эффекты приводят к ухудшению частотной избирательности по боковым каналам приема или приводят к снижению уровня помехи благодаря преселекции.
- второй метод состоит в том, что в самом приемнике реализуется соответствующая обработка входной смеси сигнала и помехи. Это позволяет выделить сигнал и полезную информацию из него.

Теоретическое обоснование второго метода и реализуемой в нем обработки сигнала может быть представлено следующим образом. Рассмотрим канал обработки в приемнике, в котором полезный сигнал $s(t, \lambda_k)$ принимается на фоне воздействия сигнала помехи $f(t, \lambda_k)$ и аддитивного шума $n(t)$. Такой процесс имеет следующий вид [8]

$$r(t) = s(t, \lambda_k) + f(t, \xi_k) + n(t),$$

где λ_k – параметры сигнала (задержка, фаза, доплеровская частота); ξ_k – параметры помехового сигнала.

Если сигнал помехового воздействия известен точно, т. е. $f(t, \xi_k)$ – это известная детерминированная функция своих времени и параметров помехового сигнала, то для исключения влияния сигнала помехи на качество приема полезного сигнала достаточно сформировать разностный сигнал

$$y(t) = r(t) - f(t, \xi_k) = n(t) + s(t, \lambda_k),$$

который в последующем подвергать обработке в приемнике.

Вычитание сигнала помехи $f(t, \xi_k)$ из наблюдений $y(t)$, представляет собой компенсацию одной из составляющих аддитивной смеси действующей на входе приемника. В результате те методы борьбы с влиянием помех на качество приема полезных сигналов, которые использует приведенный выше подход, принято называть методами компенсации помех.

В реальных ситуациях сигнал помехи, как правило, точно неизвестен. В таком случае для применения метода компенсации помех нужно сгенерировать какую-либо оценку сигнала помехи $\hat{f}(t, \xi_k)$ и использовать её в обработке вместо реального сигнала помехи $f(t, \xi_k)$.

На практике помеховый сигнал не бывает точно известным. В этом случае для использования компенсационного метода необходимо сформировать некоторую оценку помехового сигнала $\hat{f}(t, \xi_k)$ и использовать её вместо $f(t, \xi_k)$.

Из теории оптимального приема и обработки сигналов следует, что при аддитивном взаимодействии полезного сигнала, помехи и белого, как правило, гауссова, шума принцип компенсации является неотъемлемым атрибутом подавляющего большинства оптимальных алгоритмов обработки при различных моделях сигналов, помех и изменения их параметров [2]. В результате все известные подходы приема сигналов с компенсацией основываются на том, каким образом сформулировать оценку сигнала помехи $\hat{f}(t, \xi_k)$. При таком подходе очень важно иметь максимум априорной информации о параметрах и структуре действующего в радиоканале сигнала помехи.

В настоящее время имеется два возможных пути. Первый путь связан с применением фильтров, как следящих, так и трансверсальных, решающих задачу предсказания параметров помехового сигнала. Следящий фильтр реализует алгоритм оценивания расширенного вектора состояния, составленного из параметров сигнала λ_k и помехи $\xi_k: [\lambda_k, \xi_k]$. В трансверсальном фильтре (линейном фильтре с конечной импульсной характеристикой (КИХ)) весовые коэффициенты фильтра формируются на основе прогнозируемого значения отсчётов помехи по отсчётным значениям сигнала в прошлом (для одностороннего фильтра) и в будущем (для двустороннего фильтра). При этом в обоих случаях при

обработке сигналов можно ввести адаптацию. Второй путь заключается в применении обработки сигналов с изменением пространства преобразования сигналов, в настоящее время, как правило, на основе преобразования Фурье.

Дискретные ортогональные преобразования обладают одним из самых важных свойств, они позволяют концентрировать энергию спектра в некотором небольшом числе спектральных компонент. При этом если полезный сигнал и сигнал помехи основываются на различных базисных функциях, то дискретное ортогональное преобразование их смеси в базисе полезного сигнала сосредоточит спектр полезного сигнала в более узкой полосе по отношению к полосе сигнала помехи в этом же базисе. При этом дискретное ортогональное преобразование в базисе сигнала помехи позволит сосредоточить спектр сигнала помехи в более узкой полосе по отношению к полосе, которую занимает полезный сигнал. Это свойство дискретных ортогональных преобразований позволяет эффективно проводить компенсацию помеховых сигналов с использованием полосовых фильтров и осуществлять режекцию соответствующего участка спектра сигнала [9].

Также отметим, что применение дискретных ортогональных преобразований, приводящих к концентрации энергии спектра сигнала помехи в узком частотном диапазоне, является, по своей сути, декорреляцией коррелированной помехи. Коррелированной помехой является помеха с неравномерной спектральной плотностью в полосе частот полезного сигнала. Коррелированная помеха более губительна для полезного сигнала и более сильно увеличивает вероятность ошибочного приема передаваемой полезной информации по сравнению с некоррелированной помехой. Чем выше коэффициент корреляции помехового сигнала, тем ниже достоверность приема полезной информации.

IV. ВЫВОДЫ

Проведенный анализ принципов построения и применения РЭС, обеспечивающих управление КА и путей повышения помехоустойчивости, позволяет полагать возможным снижение влияния помех на качество приёма информации путём их компенсации с использованием цифровой обработки сигналов на основе ортогональных преобразований.

Указанные преобразования позволят сосредоточить спектральные составляющие сигнала и помехи в необходимых областях спектра, что обеспечит возможность их полосовой фильтрации или режекции соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Зюко А.Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи. М.: Связь, 1972. 360 с.
- [2] Помехозащищенность и эффективность систем передачи информации / А.Г. Зюко, А.И. Фалько, И.П. Панфилов и др.. М.: Радио и связь, 1985. 272 с.

- [3] Коржик В.И., Финк Л.М., Щелкунов К.Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: Справочник / Под ред. Л.М. Финка. М.: Радио и связь, 1981. 282 с.
- [4] Бернард Склад. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2020. 1104 с.
- [5] Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
- [6] 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.
- [7] Звонарев В.В., Пименов В.Ф., Попов А.С. Методика расчета помехоустойчивости приема сигнала с четырехпозиционной квадратурной фазовой манипуляцией при воздействии гармонической когерентной помехи // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2020. № 673. С. 79-89.
- [8] Спутниковая связь и вещание. Справочник / Под ред. Л.Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1988. 384 с.