

## Метод повышения достоверности и полноты данных телеметрирования в сложных условиях помеховой обстановки на основе когерентной компенсации при отсутствии явно выраженного компенсационного канала

A method for increasing the reliability and completeness of telemetry data received in difficult interference's conditions based on coherent compensation in the absence of additional channel

### Бянкин / Vyankin A.

Александр Александрович  
(aab51@mail.com)

кандидат технических наук, доцент.  
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» МО РФ (ВКА им. А.Ф. Можайского), профессор кафедры телеметрических систем, комплексной обработки и защиты информации.  
г. Санкт-Петербург

### Борненко / Bornenko N.

Никита Петрович

(n.p.bor.94@mail.ru)

ВКА им. А.Ф. Можайского, адъюнкт кафедры телеметрических систем, комплексной обработки и защиты информации.  
г. Санкт-Петербург

### Погорелов / Pogorelov B.

Богдан Романович

(pogorelovbr@gmail.com)

ВКА им. А.Ф. Можайского, инженер.  
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: достоверность – reliability; полнота – fullness; данные телеметрирования – telemetric data; когерентная компенсация помех – coherent interference compensation; послесессионная додетекторная обработка – post-session pre-detector processing.

В статье проведен краткий анализ существующих методов повышения достоверности и полноты данных телеметрирования при испытаниях летательных аппаратов, рассмотрена необходимость разработки метода когерентной компенсации помех при отсутствии явно выраженного компенсационного канала, проведена постановка задачи разработки данного метода. Рассмотрен предлагаемый метод на основе послесессионной обработки файлов додетекторной регистрации потоков оцифрованных отсчетов сигналов телеметрической информации.

In the article the present methods of increasing reliability and fullness of telemetric data for testing aircrafts and the necessity of development of coherent interference compensation without explicit compensation channel is presented. The proposed method is based on post-session processing of pre-detector recordings is described in details.

### Введение

Роль информационно-телеметрических систем (ИТС) при испытаниях летательных аппаратов (ЛА), в том числе объектов ракетно-космической техники (РКТ), трудно переоценить. Испытания могут проходить как в сложных условиях сигнально-помеховой обстановки (СПО), так и при нештатном функционировании испытываемых объектов. Действие разного рода дестабилизирующих факторов (ДФ) приводит к существенному снижению отношения сигнал-шум (ОСШ) и отношения сигнал-помеха (ОСП), что, соответственно, приводит к ухудшению достоверности и полноты данных телеметрирования (ДТ).

Под достоверностью ДТ понимается вероятность того, что значение параметра, отображенное оператору, совпадает с физической величиной параметра на изделии РКТ в момент измерения, а под полнотой ДТ – достаточность ДТ для решения задач оценки состояния, диагностирования и прогнозирования состояний систем объекта и объекта в целом.

Когерентная компенсация помех (ККП) в режиме послесессионной додетекторной обработки (ПДО) требует

применения двух каналов приема сигналов: основного (ОК), на который поступает сигнал, помеха и шум, и компенсационного (КК), на который поступает помеха и шум. Наиболее подробно этот метод описан в [1]. Для наиболее высокой эффективности ККП необходима высокая точность синхронизации потоков отсчетов принимаемых сигналов ОК и КК при обработке.

При испытаниях подвижных объектов реализация современных и наиболее эффективных методов по повышению достоверности и полноты ДТ проводится пространственным разнесением приема полезного сигнала и помехи и созданием КК, близкого к идеальному, что не всегда представляется возможным и/или экономически целесообразным, а методы оптимальной обработки сигналов аппаратной и программной фильтрации в конкретных ситуациях воздействия помех не дают нужного эффекта [1].

Высокая стоимость ТМИ, получаемой в ходе проведения испытаний, обуславливает необходимость применения всех доступных методов и средств повышения достоверности и полноты ДТ и разработки новых методов.

Цель статьи – разработка метода повышения достоверности и полноты ДТ на основе ККП при отсутствии явно выраженного КК приемно-регистрирующей аппаратуры (ПРА).

### Анализ и постановка задачи разработки метода когерентной компенсации помех при отсутствии явно выраженного компенсационного канала

Повышению достоверности и полноты ДТ посвящен ряд работ. В работах [2, 3] для восстановления ТМИ предложено использовать метод сингулярно-спек-

трального анализа додетекторной записи группового телеметрического сигнала (ГТС). Авторы указывают, что для эффективного применения данного алгоритма необходимо выбирать оптимальные значения величины окна сингулярно-спектрального разложения и количества собственных троек, используемых при восстановлении временного ряда. Недостатками данного метода является то, что при малых объемах данных или низкой информативности ряда случайные флуктуации могут оказывать сильное влияние на результаты анализа, приводя к появлению ложных гармоник или некорректному разделению сигналов.

В работах [4, 5] предлагается для повышения достоверности и полноты ДТ использовать методы разнесенного приема ТМИ на основе территориально-распределенных измерительных пунктов измерительного комплекса космодрома (ИКК). Особое внимание уделяется методам увеличения надежности и скорости передачи данных путём разделения принимаемых сигналов по частоте, времени и поляризации. Недостатками данного метода повышения достоверности и полноты ДТ являются необходимость установки нескольких приёмников и соответствующей антенной инфраструктуры, а также синхронизация функционирования разных каналов, что увеличивает как стоимость, так и сложность реализации метода.

В работе [6] для обеспечения помехозащищенности телеметрических комплексов наземного базирования в местах эксплуатации предлагается применять многоканальный автокомпенсатор с нестандартным расположением КК на основе метода степенных векторов, не требующего прямого обращения корреляционной матрицы помех. Недостатком данного метода является необходимость применения дополнительного канала с отдельной антенной, что увеличивает материальные затраты на его реализацию.

Таблица 1

Таблица наличия отличий структур штатных ГТС

Вид отличий	РТС9 ВИМ, Трал (радиолинии ВИМ-АМ)	БРС4М (радиолинии АИМ-ЧМ, КИМ-ЧМ)	РТС9 КИМ, РТС9 КИМ-А, Пирит (радиолинии КИМ-ЧМ, GMSK)	Орбита (радиолинии КИМ-ФМ, OQPSK)
пространственные	нет	нет	нет	нет
временные	есть	есть	нет	нет
частотные	нет	нет	есть при $m_f \geq 2$	нет
поляризационные	есть	есть	есть	есть

В качестве одного из направлений решения задачи максимизации степени достоверности телеметрируемых параметров в работе [1] предложено использовать методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов, использующие запись оцифрованных значений сигнала непосредственно с выходов аналоговых квадратурных каналов, называемую додетекторной регистрацией сигнала. Такой подход позволит в отложенном времени за счет усложнения процедур и применения итерационной обработки восстановить искаженную информацию в виде характеристик (амплитуды, частоты и фазы) сигнала.

Анализ этих работ показал, что применение существующих методов обеспечения требуемой достоверности и полноты регистрации ТМИ, используемых в системе информационно-телеметрического обеспечения (СИТО), в частности методы разнесенного приема и последетекторной обработки результатов телеизмерений в сложных условиях приема сигнала, не позволяют восстановить в достаточной мере ТМИ.

В настоящее время аппаратно-программные средства додетекторной регистрации оцифрованных отсчетов сигналов промежуточной частоты или оцифрованных отсчетов квадратурных составляющих принимаемой ТМИ уже входят в состав наземной ПРА отдельных разработчиков [7, 8, 9]. При этом в составе подсистемы додетекторной регистрации и послесекансной обработки ТМИ нет устройств для организации дополнительного КК [8, 9]. На практике часто встречаются ситуации воздействий ДФ в полосе полезного радиосигнала по главному лучу диаграммы направленности приемной антенны. В таких случаях невозможна компенсация, основанная на пространственной или частотной различимости сигнала и помехи, а временная различимость теоретически может использоваться только в ПРА для радиолиний с аналоговой структурой ГТС.

Реализация методов ККП возможна только при наличии отличий в структурах полезного сигнала и помехи – пространственных, временных, частотных, поляризационных. Потенциальная возможность реализации ККП для всех структур радио ГТС [10] при отсутствии дополнительного КК приведена в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что для ККП в редко используемых аналоговых радиолиниях передачи ТМИ типа РТС9 ВИМ, Трал и в аналого-цифровой структуре ГТС БРС4М [10] возможно применение методов одноканальной компенсации (без КК) [11]. В данных случаях структура ГТС имеет интервалы времени, в течении которых нет полезного сигнала (между опорными и измерительными импульсами, в зашкальных интервалах, каналные синхروпаузы), но составляющие помехи в этих интервалах времени присутствуют.

Для компенсации помех в цифровых радиолиниях передачи ТМИ типа КИМ2-ЧМ с различными индек-

сами частотной модуляции  $m_f$ , КИМ2-ФМ, GMSK и OQPSK при наличии подсистемы додетекторной регистрации в режиме послесекансной обработки и отсутствии дополнительного КК может быть использовано только поляризационное различие полезного сигнала и помехи.

В современной ПРА в составе приемных антенно-фидерных устройств метрового и дециметровых диапазонов применяют активные элементы (вибраторные, щелевые) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, которые, в свою очередь, перпендикулярны фронту плоской падающей радиоволны источника ТМИ. В этих биортогональных вибраторах, условно называемых вертикальными и горизонтальными, наводятся соответствующие составляющие принимаемого сигнала (сигналы ортогональных поляризаций В и Г). При этом в каждом поляризационном канале присутствуют в различном соотношении сигнал, помеха и шум. Каналы также условно называются каналом вертикальной (канал В) и горизонтальной (канал Г) поляризации.

Предлагается рассмотреть возможность реализации ККП обоснованным назначением одного из каналов в качестве ОК, другого – КК.

Рассмотрим график зависимости вероятности ошибки на бит (ВОБ) от ОСШ наиболее используемой в ИТС радиолинии КИМ2-ЧМ ( $m_f=1$ ) для оценки воздействия аддитивного белого гауссового шума (АБГШ) (рис. 1), полученный в ряде работ [12, 13, 18 и др.]. На рис. 1 указаны ориентировочно основные области потерь ТМИ в зависимости от функционирования системы синхронизации ПРА при различной мощности воздействия АБГШ.

Область полной потери ТМИ характерна не только существенными искажениями ДТ, но и, в первую очередь, срывами и полной потерей маркерной (кадровой) и других видов синхронизации, приводящих к потере пакетов ДТ. Так, при использовании в качестве маркера кадра ТМИ 31-разрядной М-последовательности и пороге принятия решения о ее приеме, равном 29 совпадений, при изменении ВОБ от 0,02 до 0,1 потери ДТ из-за отсутствия синхронизации возрастают от 4–5 % до 60 %. С учетом качества самих ДТ данная ситуация соответствует полной потере ТМИ. Оценка получена достаточно апробированным специальным программно-математическим обеспечением [12].

Область частичной потери ТМИ включает в себя диапазон ВОБ с  $10^{-3}$  до  $10^{-2}$ . Восстановление принятой ТМИ этого диапазона ВОБ возможно как в режиме послесекансной додетекторной, так и последетекторной обработки.

Область устойчивого приёма ТМИ, не нуждающейся в додетекторной послесекансной обработке, начинается с показаний ВОБ  $10^{-3}$  и менее. Восстановление принятой ТМИ этой зоны ВОБ считается в большинстве случаев нецелесообразным. Повы-

шение достоверности достигается методами первичной обработки.

Минимальным результатом ККП должно быть получение ВОБ порядка  $10^{-2}$  и менее.

Рассмотрим формальную постановку задачи разработки метода повышения достоверности и полноты ДТ на основе ККП.

Исходными данными для задачи являются:

Дискретная модель радиоканала передачи ТМИ после аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в виде

$$S[nT] = S_c[nT] + S_{\Pi}[nT] + N[nT],$$

где  $S_c[nT] = S_{cQ}[nT] + S_{cI}[nT]$  – квадратурный телеметрический сигнал в виде оцифрованных отсчетов, передаваемый с объекта испытаний, структура которого априорно известна,  $S_{\Pi}[nT] = S_{\Pi Q}[nT] + S_{\Pi I}[nT]$  – квадратурный сигнал от источника помехи,  $N[nT] = N_Q[nT] + N_I[nT]$  – квадратурный сигнал шумов радиолинии природного происхождения,  $n$  – номер отсчета,  $T$  – интервал времени между отсчетами (период оцифровки).

Модель  $\Phi$  первичной обработки ТМИ при испытаниях изделий ЛА в условиях воздействия ДФ на основе ККП:

$$\Phi = \langle \tau, S_{OK}, S_{KK}, P_O, P_K, N, Y_{\Pi}, Z_1, P_{OIII} \rangle,$$

где  $\tau$  – множество дискретных моментов времени  $nT$ , в которые осуществляется дискретизация аналогового информационного сигнала в АЦП приемника ПРА,  $n=1, K$  ( $K$  – номер последнего отсчета),

$S_1 = S_1[nT]$  – множество значений отсчетов выходного оцифрованного квадратурного сигнала АЦП первого канала (ПК) приемника ПРА,

$S_2 = S_2[nT]$  – множество значений отсчетов выходного оцифрованного квадратурного сигнала АЦП второго канала (ВК) приемника ПРА,

$P_1$  – параметры, характеризующие свойства (состояние) множества  $S_1$ ,

$P_2$  – параметры, характеризующие свойства (состояние) множества  $S_2$ ,

$N = N[nT]$  – множество значений отсчетов шума радиоканала передачи ТМИ,

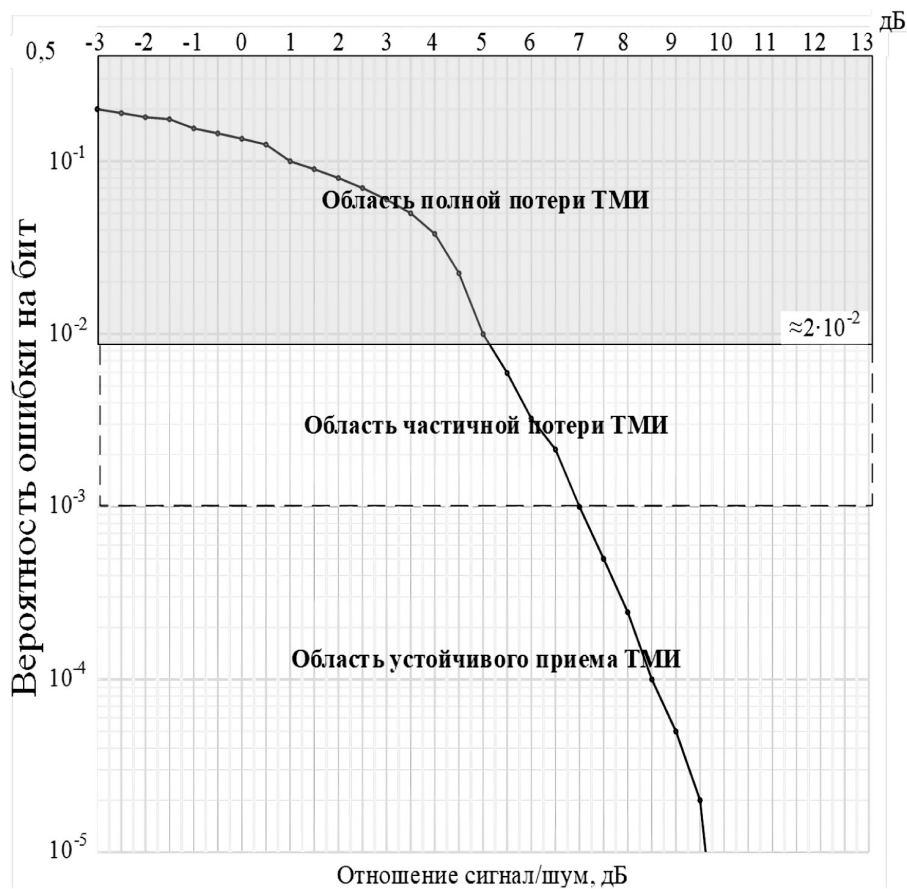


Рис. 1. Зависимость ВОБ от ОСШ радиолинии КИМ2-ЧМ с  $m_f=1$  и области приема и потерь ТМИ

$Y_{\Pi} = Y_{\Pi}[nT]$  – множество значений отсчетов входного сигнала решающего устройства приемника ПРА,

$Z_1$  – оператор цифровой обработки потоков оцифрованных отсчетов сигналов, отражающий преобразование множеств  $S[nT]$  в множество  $Y_{\Pi}[nT]$  с учетом влияний ДФ и представляющий собой модель физической системы первичной додетекторной обработки ТМИ на основе ККП,

$P_{\text{ОШ1}}$  – показатель ВОБ до обработки методом первичной обработки ТМИ.

Требуется:

Разработать метод  $Z$  додетекторной ККП в принимаемом сигнале ОК при отсутствии явно выраженного КК на основе цифровой обработки потоков оцифрованных отсчетов сигналов, позволяющий компенсировать в каждой паре квадратурных составляющих вносимые помехами искажения с целью минимизации ВОБ  $P_{\text{ОШ}}$  ТМИ, т. е.

$$Z : \langle \tau, S_1, S_2, P_1, P_2, N, Y_{\Pi}, Z_1, P_{\text{ОШ1}} \rangle \rightarrow \langle \tau, Y_{\Pi}, P_{\text{ОШ2}} \rangle, P_{\text{ОШ}} \in P_{\text{ОШ}_{\text{ном}}}, \\ P_{\text{ОШ}_{\text{ном}}} : P_{\text{ОШ2}} \leq P_{\text{ОШ1}}, P_{\text{ОШ2}} \leq 10^{-2},$$

где  $P_{\text{ОШ2}}$  – показатель ВОБ после обработки методом первичной обработки ТМИ, характеризующий его эффективность, при следующих ограничениях:

- отсчеты выходных оцифрованных сигналов АЦП ПК и ВК приемного устройства НПРС должны быть синхронизированными по времени поступления,
- разрабатываемый метод  $Z$  должен быть реализован для применения в штатных средствах СИТО,
- реализация метода должна проводиться в режиме послесеансной экспресс обработки в срок до 3 суток согласно требованиям ГОСТ РО 1410–002–2010 [14].

### Метод когерентной компенсации помех при отсутствии явно выраженного компенсационного канала

Рассмотрим предлагаемый метод ККП при отсутствии явно выраженного КК (рис. 2).

Принцип действия алгоритмов ККП основан на вычитании из помехи  $S_{\Pi}$  в ОК ее оценки  $S_{\Pi'}$ , полученной из значений помехи в КК [15, 16].

Анализ применения ПРА показывает, что применение ККП в телеметрических системах оправдано при равных ОСП и в более худших условиях приема (ОСП $\leq$ 1) при условии, что при отсутствии помехи ОСП остается на уровне, обеспечивающем ВОБ на уровне  $10^{-3}$  и менее. В таких условиях на работу приемных устройств необходимо наложить ограничение на работу устройства автоматической подстройки частоты (АПЧ). При нахождении помехи в зоне, близкой к зоне безнастроечного вхождения в синхронизацию по несущей частоте, высока вероятность вхождения в синхронизацию по частоте помехи. Именно вследствие этого целесообразно и практикуется выключение АПЧ.

Для реализации ККП в случае отсутствия антенной системы для КК в ПРА предлагается назначать один из каналов В и Г ОК, оставшийся – КК по определенному алгоритму, исходя из следующих соображений.

Рассмотрим схемы приёма вертикальной и горизонтальной поляризации сигнала и помехи в пространстве (рис. 3, а) и разложения векторов напряжений сигналов на квадратурные составляющие (рис. 3, б). Здесь  $S_c$  и  $S_{\Pi}$  – напряжения сигнала и помехи,  $S_{\text{св}}$  и  $S_{\text{сг}}$  – вертикальная и горизонтальная составляющие напряжения сигнала,  $S_{\text{пв}}$  и  $S_{\text{пг}}$  – вертикальная и горизонтальная составляющие напряжения помехи,  $W$  – комплексные коэффициенты компенсации.

При приёме радиосигнал на вибраторах антенны разделяется на вертикальную и горизонтальную поляризации, как показано на векторной диаграмме на рис. 3, а. Разделение радиосигнала на поляризации в дальнейшем используются в каналах радиоприёмных устройств ПРА. На векторной диаграмме (рис. 3, б) представлено разложение сигналов каналов В и Г на квадратурные составляющие. Так как фазовые центры антенн каналов В и Г совпадают и каналы идентичны, то и текущие фазы теоретически выде-

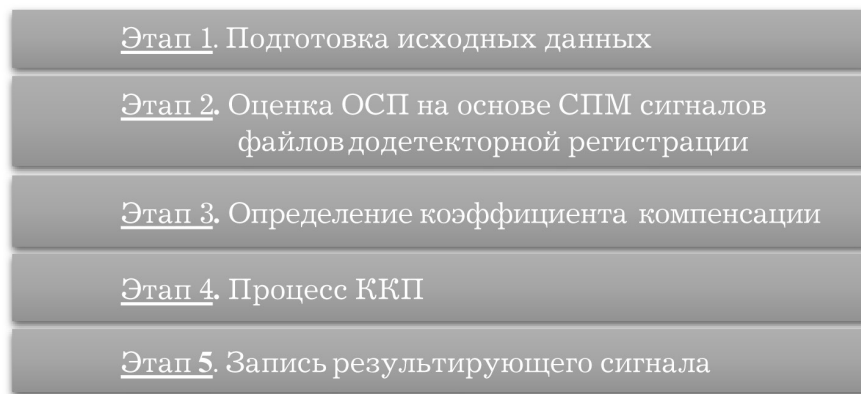


Рис. 2. Основные этапы метода ККП при отсутствии явно выраженного КК

ленных полезных составляющих сигналов  $S_{CB}$  и  $S_{CT}$  совпадают, аналогично и для составляющих сигналов помех  $S_{ПВ}$  и  $S_{ПГ}$ . Это существенно упрощает решение задачи компенсации.

Стоит отметить, что составляющие шума (не показаны на рис. 3, а) вносят погрешность в положение векторов  $(S_{CT}+S_{ПГ})$  и  $(S_{CB}+S_{ПВ})$  на плоскости составляющих напряжений, а при демодуляции сигнала данная погрешность вносит свой вклад в искажение информационного символа. В данной работе принято, что ОСШ при отсутствии помехи обеспечивает нахождение в области устойчивого приёма ТМИ.

При проведении сеансов измерений на ПРА с двухканальным приемником возможны 4 варианта сигнально-помеховой обстановки. В таблице 2 представлены ситуации с условиями распространенной шумовой составляющей с ОСШ, обеспечивающий ВОБ менее  $10^{-3}$ .

Для определения ОСП по спектральной плотности мощности (СПМ) принимаемых сигналов необходимо провести оценку мощностей сигнала и помехи согласно алгоритму оценки (рис. 4). Рассмотрим его более подробно.

1. Ввод файлов додетекторной регистрации потоков оцифрованных отсчетов сигналов в СПМО. Получение массивов отсчетов сигналов  $S_1[nT]$  и  $S_2[nT]$ , интервала длительности символа  $\tau$ , частот информационных символов  $f_0$  и  $f_1$ , индекса модуляции  $m_p$ , ширины спектра сигнала  $\Delta f$ , коэффициентов автоматической регулировки усиления (АРУ)  $ARU_1$  и  $ARU_2$ .

2. Определение спектральной плотности мощности  $G(f)$  на заданном интервале  $\tau$  для нахождения значений мощностей сигнала и ДФ и их запись в массивы данных  $G_{S_1}(f)$  и  $G_{S_2}(f)$ .

3. Определение мощности сигнала на частотах информационных символов  $f_0$  и  $f_1$  по СПМ и их запись в массивы данных  $P_{S_1, f_0}$ ,  $P_{S_1, f_1}$ ,  $P_{S_2, f_0}$  и  $P_{S_2, f_1}$ .

4. Проверка значений мощностей сигналов на частотах информационных символов  $f_0$  и  $f_1$  для определения возможного воздействия помехи. Если значения мощностей пар  $P_{S_1, f_0}$ ,  $P_{S_1, f_1}$  и  $P_{S_2, f_0}$ ,  $P_{S_2, f_1}$  примерно равны между собой, то принимается решение об определении воздействия помехи на других частотах СПМ. Если значения мощностей пар  $P_{S_1, f_0}$ ,  $P_{S_1, f_1}$  и  $P_{S_2, f_0}$ ,  $P_{S_2, f_1}$  не равны, то принимается решение о сравнении мощностей.

5. Сравнение мощностей на частотах информационных символов  $f_0$  и  $f_1$ . Если мощность на частоте  $f_0$  больше, чем на частоте  $f_1$ , то принимается решение о воздействии помехи на частоту  $f_0$ . В другом случае принимается решение о воздействии помехи на частоту  $f_1$ .

6. Определение мощностей сигнала  $P_{S_1 C}$ ,  $P_{S_2 C}$  и ДФ  $P_{S_1 ДФ}$ ,  $P_{S_2 ДФ}$ , амплитуды ДФ  $A_{S_1 ДФ}$ ,  $A_{S_2 ДФ}$  в файлах додетекторной регистрации. Мощность для сигналов определяется выбором максимального значения из мощностей на частотах  $f_0$  и  $f_1$ , для помех – сумма значений мощностей на частотах  $f_{S_1 ДФ}$  и  $f_{S_2 ДФ}$ . Амплитуда для помех определяется из мощности ДФ посредством извлечения квадратного корня.

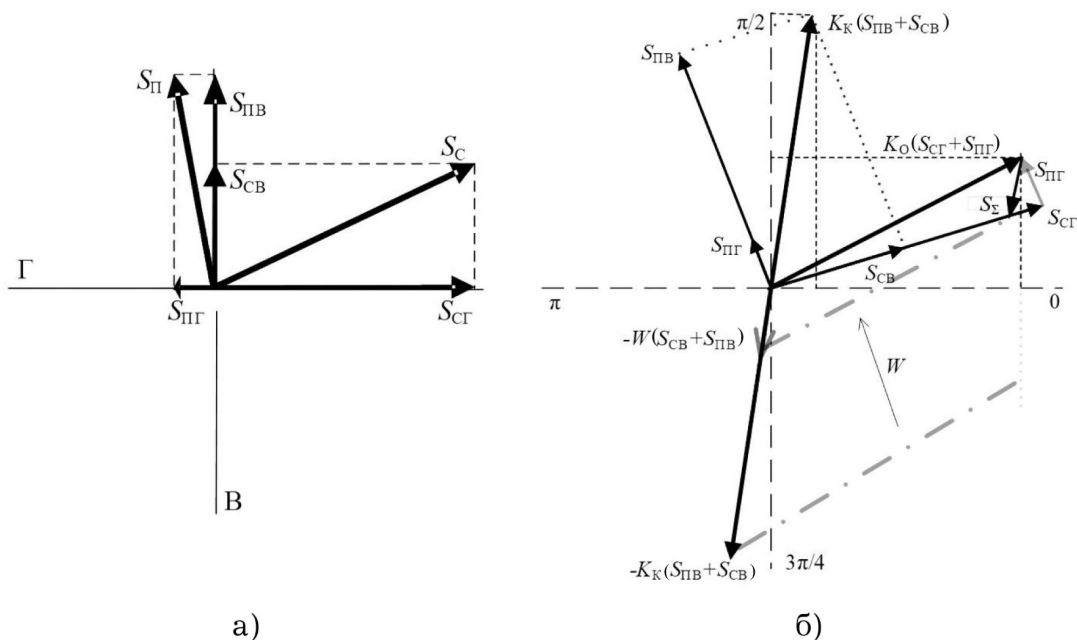


Рис. 3. Векторные диаграммы приема сигнала и помехи в пространстве (а) и разложения сигналов на квадратурные составляющие (б)

7. Определение ОСП посредством оценок мощностей сигнала и помех.

8. Если ОСП первого файла больше ОСП второго файла, то назначить первый файл в качестве ОК, амплитуду помех и коэффициент АРУ первого файла в качестве переменных ОК, а второй файл – в качестве КК, амплитуду помех и коэффициент АРУ второго файла в качестве переменных КК. В другом случае первый файл назначить в качестве КК, амплитуду помех и коэффициент АРУ в качестве переменных КК, второй файл – в качестве ОК, амплитуду помех и коэффициент АРУ второго файла в качестве переменных ОК.

Для определения результата ККП представим суммарное напряжение сигналов ОК и КК в векторном виде (рис. 3, б) для дискретных моментов времени  $nT$  как

$$S_{\Sigma} = K_O \times (S_{CO} + S_{ПО}) + W \times K_K \times (S_{СК} + S_{ПК}),$$

где  $S_{\Sigma}$  – суммарный вектор сигнала и помехи в ОК (для рис. 3, б – канал Г) и КК (для рис. 3, б – канал В),  $S_{CO}$ ,  $S_{ПО}$ ,  $S_{СК}$  и  $S_{ПК}$  – модули векторов сигнала и помехи в ОК ( $S_{CO} = S_{СГ}$ ,  $S_{ПО} = S_{ПГ}$ ) и КК ( $S_{СК} = S_{СВ}$ ,  $S_{ПК} = S_{ПВ}$ ),  $K_O$  и  $K_K$  – коэффициенты усиления ОК и КК до устройства оцифровки (линейной части каналов),  $W$  – коэффициент компенсации, множитель, определяющий величину компенсируемого напряжения в ОК. Коэффициенты усиления и АРУ в рассматриваемом случае связаны обратно пропорциональной зависимостью. Квадратурные составляющие всех перечисленных векторов также показаны на рис. 3, б.

После назначения каналов согласно алгоритму назначения ОК и КК определяется коэффициент компенсации  $W$  из условия ККП в ОК:

$$K_O \times S_{ПО} + W \times K_K \times S_{ПК} = 0.$$

Тогда

$$W = -(S_{ПО} / S_{ПК}) \times (K_O / K_K) = -(S_{ПО} / S_{ПК}) \times (ARU_K / ARU_O),$$

где  $ARU_O$  и  $ARU_K$  – коэффициенты АРУ ОК и КК приемного устройства НПРС.

Суммарный сигнал в ОК после компенсации

$$S_{\Sigma} = K_O \times (S_{CO} + S_{ПО}) + W \times K_K \times (S_{СК} + S_{ПК}) = K_O \times S_{CO} \times (1 - S_{ПО} S_{СК} / S_{ПК} S_{CO}). \quad (1)$$

Анализ выражения (1) показывает, что в зависимости от отношений мощностей сигнала и помехи в ОК и КК возможны два противоположных результата компенсации. Результат, близкий к идеальному, возможен при максимальном наведении сигнала и помехи в разных каналах (ортогональные поляризации сигнала и помехи), при этом полезный сигнал не ослабляется. При равенстве составляющих сигнала и помехи в каналах происходит полная компенсация как помехи, так и сигнала. При программной реализации компенсации вычисления производятся над квадратурными составляющими векторов ОК ( $S_{CO} + S_{ПО}$ ) и КК ( $S_{СК} + S_{ПК}$ ).

### Компьютерное моделирование метода когерентной компенсации помех при отсутствии ярко выраженного компенсационного канала

Исходными данными моделирования являются вид модуляции в штатных РТС (РТС-9Ц, БРС-4М, ПИРИТ и др.) – КИМ2-ЧМ (индекс модуляции  $m_f - 1$ ) информативности 1024 (1024000 бит/с). В качестве ДФ приняты помеха АБГШ с шириной спектра, равной ширине полосы пропускания приемника, полоса которой согласована со спектром сигнала, и многочастотная помеха (МП) вида «немодулированная несущая» (ПНН) (узкополосный гармонический сигнал).

Таблица 2

#### Возможные ситуации сигнально-помеховой обстановки при проведении сеансов измерений испытаний ЛА

Номер варианта	Первый канал	Второй канал	Какой канал выбирается в качестве	
			ОК	КК
1	ОСП < 1		С лучшим ОСП	С худшим ОСП
2	ОСП > 1	ОСП < 1	Первый	Второй
3	ОСП < 1	ОСП > 1	Второй	Первый
4	ОСП > 1		С лучшим ОСП	С худшим ОСП

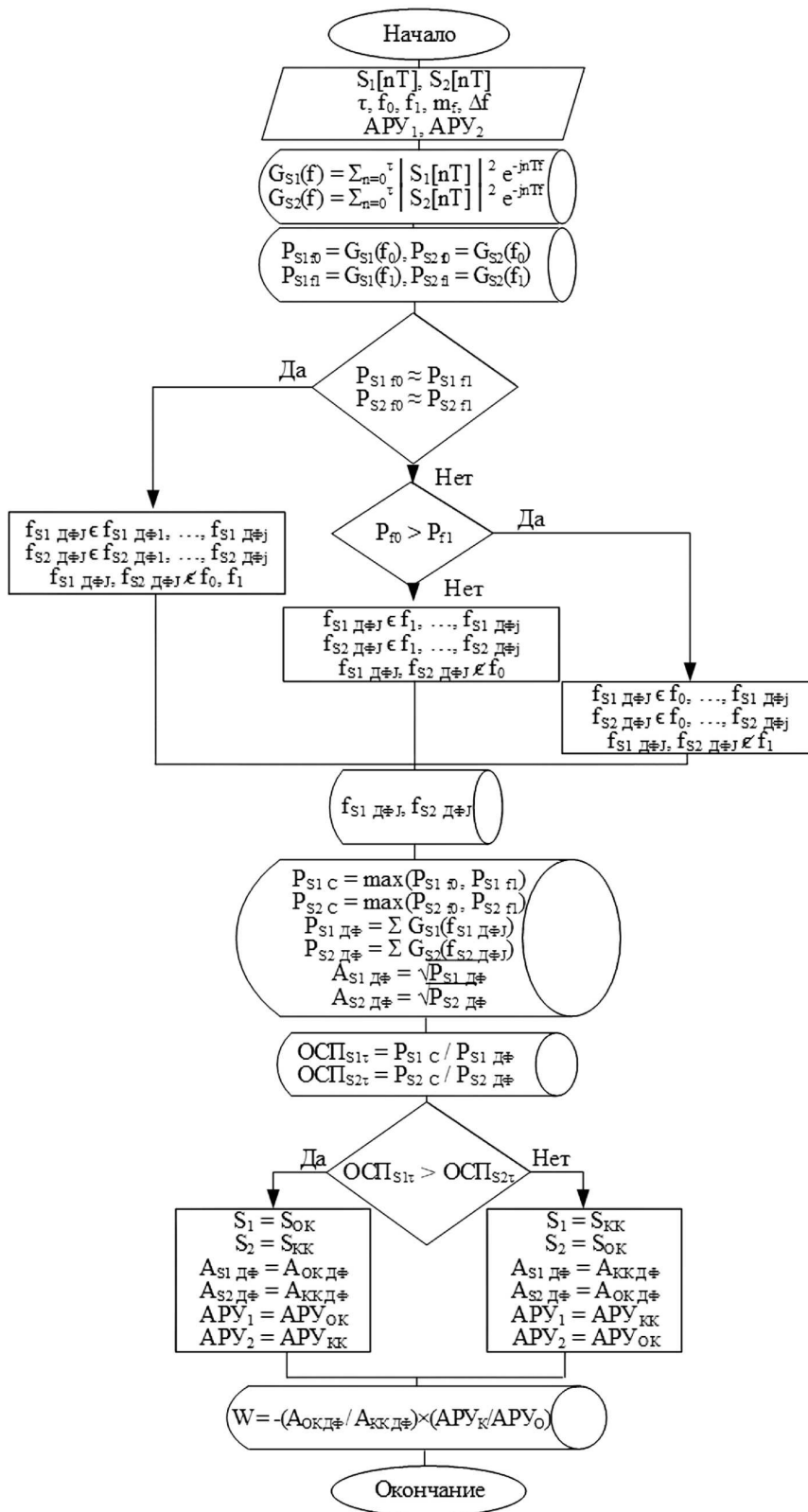


Рис. 4. Схема алгоритма определения коэффициента компенсации по оценке ОСР на основе СПМ сигналов файлов додетекторной регистрации

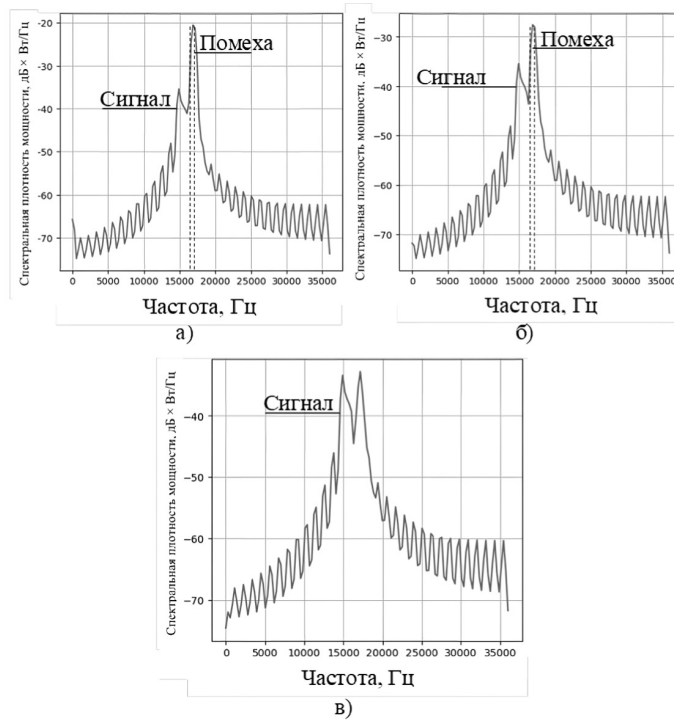


Рис. 5. Графики СПМ случая воздействия многочастотной помехи на частоту  $f_1$  сигнала структуры КИМ2-ЧМ: а) СПМ КК, б) СПМ ОК, в) СПМ ОК после обработки методом

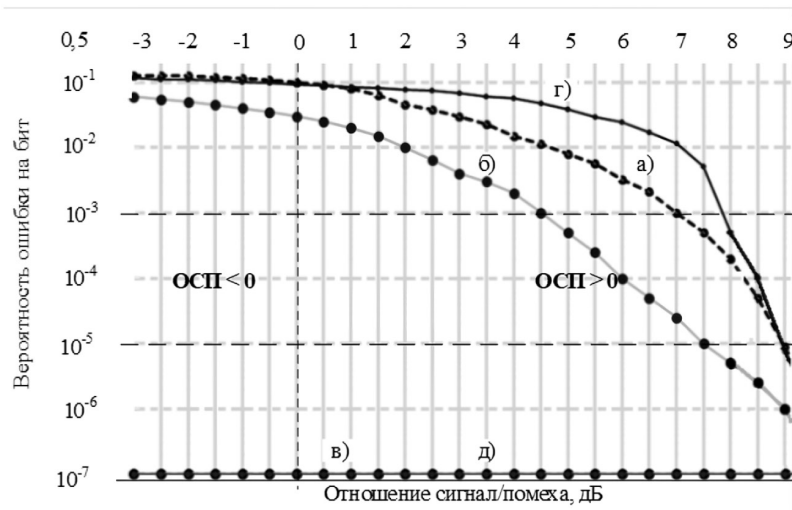


Рис. 6. Графики зависимости ВОБ от ОСП при воздействии помех в виде АБГШ и МП в виде ПНН на сигнал структуры КИМ2-ЧМ: а) АБГШ с шириной спектра, равной ширине полосы пропускания приемника, полоса которого согласована со спектром сигнала, б) МП с 4 составляющими до обработки, в) МП с 4 составляющими после обработки, г) МП с 8 составляющими до обработки, д) МП с 8 составляющими после обработки

Основным показателем эффективности повышения достоверности и полноты ДТ рассматривается ВОБ информационного потока.

Рассмотрим результаты моделирования функционирования предлагаемого метода. Проведено моделирование для двух случаев воздействия помех.

На рис. 5 представлены графики СПМ случая воздействия МП на частоту информационного символа  $f_1$ .

На рис. 6 представлены зависимости ВОБ от ОСП при воздействии помех в виде помехи АБГШ с шириной спектра, равной ширине полосы пропускания приемного устройства, полоса которого согласована со спектром сигнала (а), МП с 4 составляющими в виде ПНН до (б) и после (в) обработки методом, МП с 8 составляющими в виде ПНН до (г) и после (д) в СПМО [18, 20].

Анализ результатов показывает существенную зависимость ВОБ от вида помехи. Имитационная помеха даже по сравнению с наиболее дестабилизирующей помехой вида АБГШ при одинаковом ОСП переводит в область частичной и полной потери ТМИ.

Из рис. 6 видно, что предлагаемый метод наиболее эффективен при ОСП менее 9 дБ. С ростом ОСП кривые б) и г) сходятся к зависимости а). Для наглядности действия предлагаемого метода проведено моделирование воздействия помехи при ОСП более 10 дБ, что объясняет значение ВОБ  $10^{-7}$  после обработки методом. Также моделирование подтвердило, что чем больше мощность сигнала в КК, тем выше уровень ослабления информационного сигнала в ОК после обработки методом, что требует дополнительных мер по его нормализации для дальнейшей обработки.

Обеспечение требуемой полноты ДТ (потери ДТ  $\leq 2\%$ ) достигается практически для всех штатных цифровых структур ГТС получением в результате компенсации ВОБ от  $2 \cdot 10^{-2}$  (потери 4–5 %) до  $10^{-2}$  (2 %) и меньше. Для радиолиний с ОСП, обеспечивающим при отсутствии специальных помех попадание в области частичной потери и уверенного приема ТМИ, ККП обеспечивает требуемую помехозащищенность и, соответственно, достоверность и полноту ДТ.

## Заключение

В данной работе проведен краткий анализ существующих методов повышения достоверности и полноты ДТ при испытаниях ЛА, в т. ч. объектов РКТ, рассмотрена необходимость разработки метода ККП при отсутствии явно выраженного КК, проведена постановка задачи разработки данного метода. Для разработки новых методов повышения достоверности и полноты ДТ предлагается использовать существующие аппаратно-программные средства додетекторной регистрации оцифрованных отсчетов сигналов промежуточной частоты или оцифрованных отсчетов квадратурных составляющих принимаемой ТМИ. Рассмотрен предлагаемый метод ККП при отсут-

ствии явно выраженного КК на основе послесекансной обработки файлов додетекторной регистрации. Для реализации ККП в случае отсутствия отдельного тракта КК в ПРА предлагается назначать один из каналов В и Г ОК, оставшийся – КК по предложенному алгоритму. Приведены результаты компьютерного моделирования в СПМО [18, 20], доказывающие эффективность предлагаемого метода ККП, в том числе при ОСП в каналах меньше 1. Основным недостатком предлагаемого метода является высокий уровень подавления информационного сигнала при соизмеримых ОСП в каналах, что требует применения дополнительных мер по его нормализации в решающих устройствах опознавания символов.

## Литература

1. Бянкин, А.А. Преддетекторная обработка телеметрической информации в условиях воздействий дестабилизирующих факторов / А.А. Бянкин, Н.П. Борненко // Информация и Космос. – 2024. – № 4. – С. 6–15.
2. Дуников, А.С. Алгоритм восстановления телеметрической информации на основе применения метода сингулярноспектрального анализа додетекторной записи сигнала / А.С. Дуников, А.А. Бянкин, Р.В. Митронин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2020. – Т. 18, № 5. – С. 20–34.
3. Дуников, А.С. Восстановление телеметрической информации летательных аппаратов с учетом выбора параметров сингулярно-спектрального разложения додетекторной записи сигнала / А.С. Дуников, А.А. Бянкин, Э.А. Бардаев // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2021. – №1 (35). – С. 35–43.
4. Воронцов, В.Л. Методы разнесенного приема телеметрической информации и условия их применения в процессе развития телеметрического комплекса космодрома / В.Л. Воронцов. – Набережные Челны : ИПЦ КГИЭА, 2009. – 286 с.
5. Воронцов, В.Л. Об оценке эффективности разнесенного приема телеметрической информации при летных испытаниях ракетно-космической техники / В.Л. Воронцов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 7. – С. 50–53.
6. Семенов, В.Ю. Подавление узкополосных стационарных помех в телеметрическом комплексе на основе автокомпенсатора с удаленными каналами / В.Ю. Семенов, А.В. Коротышев // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – № 12. – С. 2.
7. Васильев, В.С. Разработка и совершенствование приемно-регистрирующих телеметрических комплексов для полигонных измерительных комплексов / В.С. Васильев, А.В. Коротышев, А.В. Чернов // Информация и Космос. – 2020. – № 3. – С. 79–84.
8. Станция МПРС–ПМВ. Руководство по эксплуатации. Часть 1. РЭ ЯГАИ.464349.044–2018. – 40 с.
9. ИТМК. Руководство по эксплуатации. РЭ ГВАТ.467461.007. – 2018. – 75 с.

10. Телеметрия : учебник / А.И. Лоскутов, А.А. Бянкин, Г.И. Козырев [и др.]. – Санкт-Петербург : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – 343 с.

11. Костров, В.В. Компенсация помех в радиотехнических системах. Оценочно-корреляционный подход / В.В. Костров // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – № 1 (13). – С. 21–34.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616863 Российская Федерация. Программный комплекс исследования процессов синхронизации в информационно-телеметрических системах / Б.Р. Погорелов, А.А. Бянкин, В.П. Обрученков : заявл. 20.04.2021 : опубл. 28.04.2021. – Бюл. № 5.

13. Анненков, А.М. Модель радиоканала с частотной модуляцией и непрерывной фазой / А.М. Анненков // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – № 7. – С. 3.

14. Шмелев, В.В. Порядок формирования требований к качеству обработки измерительной информации ракетно-космической техники / В.В. Шмелев, Е.В. Копкин, Е.Б. Самойлов // Вооружение и экономика. – 2018. – № 2 (44). – С. 23–28.

15. Адаптивные алгоритмы компенсации помех : учебно-методическое пособие / Д.Н. Ивлев, И.Я. Орлов, А.В. Сорокина, Е.С. Фитасов. – Нижний Новгород : ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2014. – 88 с.

16. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Ю.И. Лосев, А.Г. Бердников, Э.Ш. Гойхман, Б.Д. Сизов. – Москва : Радио и связь, 1988. – 208 с.

17. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н.А. Спиринов, В.В. Лавров, Л.А. Зайнуллин [и др.]. – Екатеринбург : ООО «УИИЦ», 2015. – 290 с.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024616654 Российская Федерация. Специальное программно-математическое обеспечение информационно-управляющего комплекса испытательного стенда штатных и перспективных цифровых радиолиний / Н.П. Борненко, А.Е. Зеляк : заявл. 06.03.2024 : опубл. 22.03.2024. – Бюл. № 4.

19. Модели оценки воздействий внешних дестабилизирующих факторов на достоверность телеметрической информации при испытаниях и эксплуатации летательных аппаратов / Н.П. Борненко, А.А. Бянкин, Б.Р. Погорелов, А.М. Полунинов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2025. – Т. 18, № 10. – С. 57–70.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026610252 Российская Федерация. Программный комплекс исследования алгоритма когерентной додетекторной компенсации помех при приеме телеметрической информации на приемно-регистрирующую аппаратуру в условиях воздействий дестабилизирующих факторов / Н.П. Борненко, Б.Р. Погорелов, С.А. Федощенко : заявл. 19.12.2025 : опубл. 13.01.2026. – Бюл. № 1.