

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ СКРЫТНОСТИ СПУТНИКОВЫХ КАНАЛОВ РАДИОСВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ. ЧАСТЬ 2

А.А. Ломакин¹, Д.Г. Пантенков^{1*}, В.М. Соколов²

¹АО «Кронштадт»,

Москва, 115432, Российская Федерация

²ПАО «РКК «Энергия»

Московская обл., г. Королев, 141070, Российская Федерация

*Адрес для переписки: pantenkov88@mail.ru

Информация о статье

УДК 621.396

Статья поступила в редакцию 18.04.2019

Ссылка для цитирования: Ломакин А.А., Пантенков Д.Г., Соколов В.М. Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Часть 2 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 37–48. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-37-48

Аннотация: Статья посвящена рассмотрению вопросов скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами и структурно состоит из двух частей. В первой части рассмотрены следующие вопросы: проведена общая постановка задачи разработки модели системы спутниковой связи, обеспечивающая ее скрытное функционирование от средств радиомониторинга; представлен математический аппарат оценки эффективности мер обеспечения пространственной избирательности при организации линий спутниковой связи на скрытность их функционирования; разработана модель функционирования системы спутниковой связи с применением методов сигнальной обработки для обеспечения скрытности ее функционирования; в заключении сформулированы предложения и рекомендации по обеспечению скрытности спутникового канала радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Поскольку у проводящего радиомониторинг априорно отсутствует полная достоверная информация о сигнале, то во второй части статьи рассмотрены методы его квазиоптимальной обработки на основе авто- и взаимокорреляционных функций, что позволяет получить существенный энергетический выигрыш и обнаружить полезный сигнал даже при очень малом уровне его мощности на входе. Применение устройств автокорреляционной обработки сигналов значительно улучшает эффективность ведения радиомониторинга, что особенно актуально при отрицательных отношениях мощностей полезного сигнала и шумов на входе приемника. К основным положениям второй части статьи следует отнести математическую модель функционирования средств радиомониторинга в условиях принятия мер по обеспечению скрытности передачи информации, а также результаты расчетов параметров системы спутниковой связи при условии обеспечения ее скрытности.

Ключевые слова: комплексы с беспилотными летательными аппаратами, система спутниковой радиосвязи, космический аппарат, средства радиомониторинга, математическое моделирование, помехозащитность, скрытность спутниковой радиолинии, сигнально-энергетические параметры, устройства автокорреляционной обработки сигналов

Введение

В первой части статьи [1] рассмотрен ряд следующих принципиальных и актуальных с практической точки зрения вопросов обеспечения скрытности спутниковых каналов радиосвязи в интересах комплексов с беспилотными летательными аппаратами:

– обзор созданных отечественной промышленностью экспериментальных и опытных образцов комплексов с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) тяжелого и сверхтяжелого классов большой продолжительности полета;

– краткий анализ исследований ряда авторов в области скрытного функционирования спутниковой связи (СпС) от средств радиомониторинга (РМ);

– оценка эффективности мер обеспечения пространственной избирательности при организации линий СпС;

– модель функционирования системы СпС с применением методов сигнальной обработки для обеспечения скрытности ее функционирования от средств РМ.

На основе проведенного анализа функционирования системы СпС в условиях противодействия средствам РМ были сформированы следующие предложения и рекомендации по обеспечению скрытности спутникового канала радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами [1].

Во-первых, максимально использовать пространственную скрытность космического аппарата (КА).

Во-вторых, минимизировать ширину диаграммы направленности (ДН) и мощность излучения связанного сигнала за счет увеличения добротности приемного тракта средства земной станции (ЗС) СпС (БЛА). Кроме того, в процессе функционирования системы необходимо адаптивно изменять мощность излучения сигнала в зависимости от складывающейся радиоэлектронной обстановки (потерь в атмосфере, скорости передачи информации, мест дислокации и другой информации о средствах РМ).

И, в-третьих, использовать в средствах СпС сигнально-кодовые конструкции с минимальными пороговыми значениями отношения энергии бита сигнала к спектральной плотности мощности шума в сочетании с методами оптимальной обработки (корреляционная обработка сигналов и согласованная фильтрация).

Далее во второй части статьи будут рассмотрены вопросы функционирования средств РМ в условиях принятия мер по обеспечению скрытности информационного обмена между ЗС и БЛА с использованием каналов СпС, а также проанализированы результаты расчетов ее параметров в этих условиях.

1. Модель функционирования средств РМ в условиях принятия мер по обеспечению скрытности передачи информации

Одной из основных задач средств РМ, определяющих эффективность его функционирования, является обнаружение сигналов мониторинга, которое заключается в определении факта наличия сигнала при наличии на входе обнаружителя сигнала $s(t)$ и шума $n(t)$, либо факта отсутствия сигнала при наличии на входе обнаружителя только шума.

В соответствии с критерием Неймана – Пирсона в обнаружителе решение о наличии или отсутствии сигнала принимается на основе сравнения отношения правдоподобия с выбранным порогом, которое в общем случае имеет следующий вид [2]:

$$q = \frac{2}{N_0} \cdot \int_0^{T_n} \xi(t) \cdot s(t) dt \geq h_{\text{пор}}, \quad (1)$$

где $\xi(t)$ – суммарный сигнал на входе обнаружителя, равный:

$$\xi(t) = \lambda \cdot s(t) + n(t), 0 \leq t \leq T_n, \quad (2)$$

где λ – параметр, принимающий значение «1» при наличии сигнала или «0» при его отсутствии; T_n – интервал наблюдения сигнала; $h_{\text{пор}}$ – порог обнаружения сигнала.

Схема обнаружителя сигналов, реализующая данную логику, представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Схема обнаружителя сигналов

При ведении РМ не только шум является случайным процессом, но и параметры обнаруживаемого сигнала. В зависимости от закона изменения случайных параметров сигнала меняется и отношение правдоподобия, следовательно, и эффективность решения задачи обнаружения [1–3].

На практике при ведении РМ в условиях априорной информационной неопределенности о параметрах сигналов РМ возможно существование двух типов моделей сигналов на входе обнаружителя: сигнал со случайной начальной фазой и сигнал со случайной амплитудой и начальной фазой.

Модель сигнала со случайной начальной фазой наблюдается при распространении сигнала РМ на трассах при отсутствии замираний, либо когда имеют место медленные замирания. Второй тип модели имеет место, когда сигнал РМ распространяется на трассе с быстрыми замираниями.

Эффективность решения задачи обнаружения сигналов (вероятность правильного обнаружения) определяется нижеследующими соотношениями [2].

Для модели сигнала со случайной начальной фазой:

$$P_{\text{обн}} = 1 - \int_{h_{\text{пор}}}^{\infty} \vartheta \cdot \exp\left(-\frac{\vartheta^2 + \frac{2 \cdot E}{N_0}}{2}\right) \times I_0\left(\vartheta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E}{N_0}}\right) d\vartheta, \quad (3)$$

где $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка; $\frac{2 \cdot E}{N_0}$ – отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума на входе обнаружителя, которое равно [2]:

$$\frac{2 \cdot E}{N_0} = q_{\text{обн}} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}}, \quad (4)$$

где $q_{\text{обн}}$ – отношение средней мощности сигнала РМ к средней мощности шумов на входе обнаружителя сигналов; $h_{\text{пор}}$ – пороговый уровень обнаружения сигнала, выбираемый из условия [2]:

$$h_{\text{пор}} = \sqrt{-\ln(P_{\text{лт}})}, \quad (5)$$

где $P_{\text{лт}}$ – вероятность ложной тревоги при решении задачи обнаружения сигнала.

Для модели сигнала со случайной амплитудой и начальной фазой [2]:

$$P_{\text{обн}} = P_{\text{лт}}^{\frac{1}{1+N_0}}. \quad (6)$$

Для рассмотренных двух моделей сигналов получены аналитические зависимости вероятности правильного обнаружения сигнала от отношения средней мощности сигнала РМ к средней мощности шумов на входе обнаружителя для фиксированных значений вероятности ложной тревоги, которые в графическом виде представлены на рисунке 2.

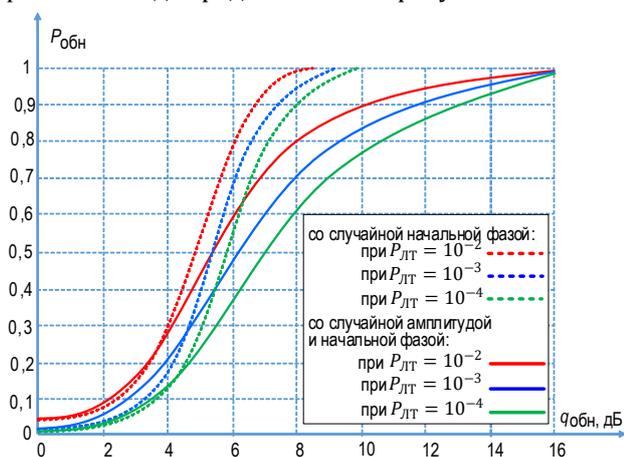


Рис. 2. Зависимости вероятности правильного обнаружения ($P_{\text{обн}}$) от отношения средней мощности сигнала к средней мощности шумов ($q_{\text{обн}}$) на входе обнаружителя для двух моделей сигналов

Анализ полученных зависимостей показывает, что вероятность обнаружения существенно образом зависит от модели сигнала РМ, вероятности ложной тревоги и от отношения средней мощности сигнала РМ к средней мощности шумов на входе обнаружителя (далее отношение сигнал/шум – $q_{\text{обн}}$). Из анализа аналитических выражений (1–6) следует, что для заданной модели сигнала в качестве показателя эффективности решения задачи обнаружения целесообразно принять вероятность правильного обнаружения сигнала ($P_{\text{обн}}$) при заданной величине порога ($h_{\text{пор}}$) или вероятности ложной тревоги ($P_{\text{лт}}$).

При проведении оценки эффективности ведения РМ необходимо исходить из наихудших условий по скрытности обнаруживаемого сигнала, которая соответствует более низкой вероятности обнаружения. Далее при проведении расчетов при ведении РМ примем: $P_{\text{обн}} \geq 0,1$; $P_{\text{лт}} = 10^{-3}$. Для выполнения этих требований по эффективности обнаружения

сигналов необходимо, чтобы $q_{\text{обн}}$ на входе обнаружителя составляло не менее 3,5 дБ для сигналов со случайной начальной фазой и $q_{\text{обн}} \geq 3$ дБ для сигналов со случайной амплитудой и начальной фазой.

Из анализа зависимостей (см. рисунок 2) также следует, что эффективность обнаружения зависит от средней мощности сигнала РМ, которая определяется его энергией, а, следовательно, и временем его наблюдения. В типовых условиях обнаружения полная мощность сигнала достигается при минимальном времени наблюдения, которое равно длительности элементарной посылки.

Как показывают энергетические расчеты [1–5], в большинстве практических случаев обеспечить в радиолиниях СпС требуемое для эффективного обнаружения отношение сигнал/шум не всегда представляется возможным.

Известно, что при линейном усилении отношение сигнал/шум не изменяется. Применение же в средствах РМ методов оптимального приема не представляется возможным, так как при этом необходимо обеспечить выполнение двух условий: наличие копии сигнала и наличие синхронизации обнаруживаемого сигнала с копией по частоте и по времени прихода.

При ведении РМ вследствие априорной информационной неопределенности о параметрах сигналов (несущей частоте, виде модуляции, скорости передачи информации и т.д.) выполнение этих условий не представляется возможным. Анализ известных методов ведения РМ энергетически слабых сигналов показывает, что в этих обстоятельствах обеспечить необходимое для эффективного обнаружения отношение сигнал/шум представляется возможным за счет применения методов авто- или взаимокорреляционной обработки сигналов, которые не требуют знания копии сигнала РМ.

Эквивалентные схемы обнаружителя сигналов на базе приемников авто- и взаимокорреляционной обработки представлены на рисунке 3. С позиции эффективности эти схемы обнаружителей сигналов обеспечивают примерно одинаковый выигрыш в отношении сигнал/шум на его выходе по сравнению со входом. Обнаружитель сигналов на базе автокорреляционного приемника более прост в технической реализации, поэтому далее остановимся на рассмотрении данного типа обнаружителя. В схеме обнаружителя данного типа, в отличие от традиционного, дополнительно последовательно включен автокорреляционный приемник. Автокорреляционный приемник в процессе свертки принимаемого сигнала осуществляет квазикогерентное накопление энергии полезного сигнала и некогерентное – шума, в результате чего отношение сигнал/шум на его выходе по мере накопления увеличивается. В момент времени T_0 , соответствующий максимуму отношения сигнал/шум

на выходе автокорреляционного приемника, производится отсчет и принятие решения о наличии/отсутствии сигнала.

В настоящее время известно несколько типов устройств, реализующих различные методы автокорреляционной обработки сигналов. Наибольшую эффективность (максимум отношения сигнал/шум на выходе) обеспечивают устройства, согласованные по виду модуляции с обрабатываемым сигналом [1–2]. При проведении оценки времени обнаружения сигнала средствами РМ следует исходить из того, что осуществляющий мониторинг находится в наиболее благоприятных для него условиях. Тогда можно предположить, что он применяет для ведения РМ устройства автокорреляционной обработки сигналов (УАКОС), согласованные с видом модуляции сигнала РМ [9–14].

В данном контексте рассматривается система, в которой для скрытой передачи сигналов применяются шумоподобные широкополосные сигналы с фазовой манипуляцией. Анализ известных методов автокорреляционной обработки сигналов показывает, что в этих условиях в наибольшей степени удовлетворяет метод фазоманипулированного (ФМн) сигнала на удвоенной частоте вспомогательного гетеродина. Структурная схема приемника-обнаружителя, использующего УАКОС, реализующая данный метод, представлена на рисунке 4.

Сигнал с выхода линейного тракта приемника на частоте f_c поступает на два канала преобразования частоты, а на другие входы смесителей поступает сигнал гетеродина f_r . В каждом из каналов осуществляется перенос сигнала по частоте и его последующая фильтрация. Сигналы в одном канале переносятся на частоту $f_c + f_r$, а в другом – на частоту $f_c - f_r$. Преобразованные таким образом сигналы с обоих каналов поступают на соответствующие входы умножителя коррелятора, на выходе которого формируется сигнал свертки $\xi^2(t, 2f_r)$ на удвоенной частоте гетеродина. Этот сигнал свертки подается на узкополосный фильтр, выполняющий роль интегратора, на выходе которого образуется сигнал автокорреляционной свертки [14]:

$$P_{\text{обн}} = Pv(t) = \int_0^{T_n} \xi^2(t, 2f_r) dt \frac{1}{1 + \frac{E}{N_0}} \quad (7)$$

В момент времени T_0 , равный T_n , который соответствует максимуму сигнала свертки, производится отсчет сигнала свертки в обнаружителе. При свертке двух составляющих суммарного входного сигнала, содержащего полезный сигнал $s(t)$ и шум $n(t)$, в умножителе образуются 4 компоненты вида:

$$s(t) \times s(t), s(t) \times n(t), n(t) \times s(t), n(t) \times n(t).$$

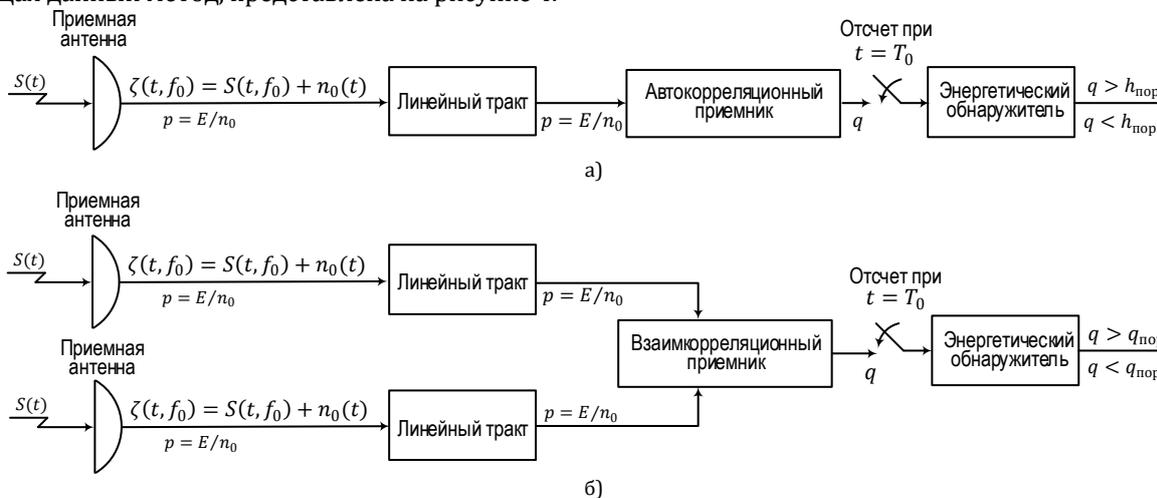


Рис. 3. Эквивалентная схема обнаружителя сигналов на базе автокорреляционного (а) и взаимокорреляционного приемников (б)

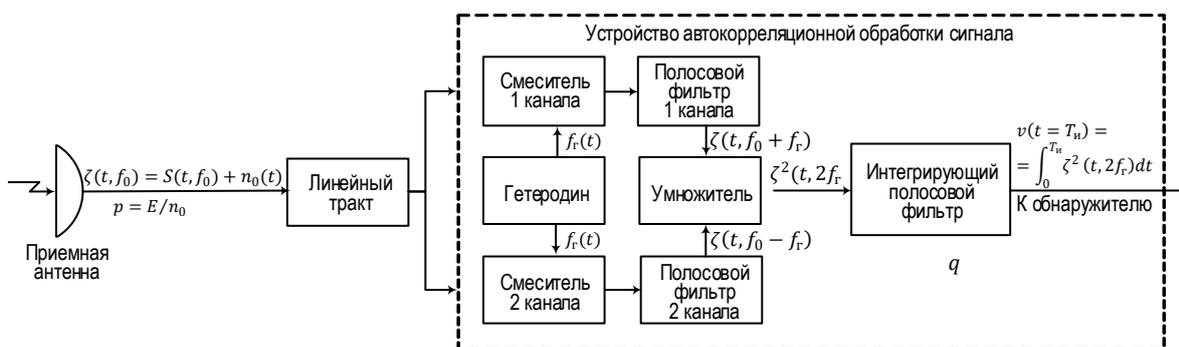


Рис. 4. Структурная схема приемника-обнаружителя, использующего УАКОС, реализующего метод свертки ФМн-сигнала на удвоенной частоте вспомогательного гетеродина

С позиции обнаружения сигнала первые три являются полезными, а последняя – помехой.

На выходе УАКОС величина отношения сигнал/шум зависит от целого ряда нижеперечисленных параметров.

1) Эквивалентная база сигнала, рассчитываемая по выражению: $B = \Delta f_c \cdot T_{ин}$.

2) Расстройка несущей частоты принимаемого сигнала f_c и центральной частоты приемника f_0 , определяемая относительной расстройкой по частоте: $\alpha_f = |f_0 - f_c|/\Delta f_{пн}$, где $\Delta f_{пн}$ – полоса пропускания приемника.

3) Расстройка ширины высокочастотного спектра принимаемого сигнала Δf_c относительно полосы пропускания приемника $\Delta f_{пн}$, определяемая относительной полосой частот приема:

$$\beta_{пн} = \begin{cases} \Delta f_{пн}/\Delta f_c & \text{при } \Delta f_{пн} \leq \Delta f_c \\ \Delta f_c/\Delta f_{пн} & \text{при } \Delta f_{пн} > \Delta f_c \end{cases} \quad (8)$$

4) Расстройка времени обработки сигналов в приемнике, определяемая относительной расстройкой по времени обработки сигналов:

$$\gamma_{в} = \begin{cases} \frac{T_{нс} - T_{ни}}{T_{и}} & \text{при } T_{нс} \geq T_{ни} \\ \frac{T_{кс} - T_{ки}}{T_{и}} & \text{при } T_{нс} < T_{ни} \end{cases}, \quad (9)$$

где $T_{ни}$ и $T_{ки}$ – время начала и конца интегрирования сигнала в УАКОС; $T_{нс}$ и $T_{кс}$ – время начала и окончания сигнала на входе приемной системы.

С применением метода спектрального анализа применительно к УАКОС, реализующего метод свертки сигнала на удвоенной частоте вспомогательного гетеродина, получено выражение для отношения мощности сигнала к мощности шума на выходе УАКОС в зависимости от указанных параметров при решении задачи обнаружения:

$$q = \frac{K_{\gamma}^2 \rho^2 B_{эк}(1 - |\gamma_{в}|)}{2\pi^2} \times \left\{ \text{Si}[\pi(1 - |\gamma_{в}|)] - \text{Si}[\pi(|\gamma_{в}| - 1)] + \frac{\sin^2[\pi(1 - |\gamma_{в}|)]}{[\pi(1 - |\gamma_{в}|)]} - \frac{\sin^2[\pi(|\gamma_{в}| - 1)]}{[\pi(|\gamma_{в}| - 1)]} \right\} \times$$

$$\times \frac{K_{\gamma}^2 \rho(1 - \alpha_f)}{\pi\beta_{пн}} \times \left\{ \frac{\sin^2[\pi\beta_{пн}(2\alpha_f + 1)]}{\pi\beta_{пн}(2\alpha_f + 1)} - \frac{\sin^2[\pi\beta_{пн}(2\alpha_f - 1)]}{\pi\beta_{пн}(2\alpha_f - 1)} + \text{Si}[\pi\beta_{пн}(2\alpha_f + 1)] - \text{Si}[\pi\beta_{пн}(2\alpha_f - 1)] \right\}^2 \times \quad (10)$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{\sin^2[\pi\beta_{пн}(2\alpha_f + 1)]}{\pi\beta_{пн}(2\alpha_f + 1)} - \frac{\sin^2[\pi\beta_{пн}(2\alpha_f - 1)]}{\pi\beta_{пн}(2\alpha_f - 1)} + \text{Si}[\pi\beta_{пн}(2\alpha_f + 1)] - \text{Si}[\pi\beta_{пн}(2\alpha_f - 1)] \right\}^{-1}$$

где $B_{эк}$ – эквивалентная база сигнала, равная $B_{эк} = \Delta F_{пр} \cdot T_{инт}$; $\Delta F_{пр}$ – полоса пропускания УАКОС;

$T_{инт}$ – время интегрирования в УАКОС; $\text{Si}(z)$ – интегральный синус, равный $\text{Si}(z) = \int_0^z \frac{\sin(x)}{x} dx$.

С помощью этого выражения получен ряд функциональных зависимостей отношения мощности сигнала от мощности шумов на выходе УАКОС при решении задачи обнаружения от ряда параметров. На рисунке 5 представлены зависимости отношения мощности сигнала от мощности шумов на выходе УАКОС от отношения мощности сигнала к мощности шумов на входе УАКОС для фиксированных значений эквивалентной базы сигналов $B = 20, 25, 30$ и 40 дБ (соответственно, красная, синяя, зеленая и фиолетовая линии) при $\alpha_f = 0$, $\beta_{пн} = 1$ и $\gamma_{в} = 0$.

На рисунках 6а–6г представлены зависимости отношения мощности сигнала к мощности шумов на выходе УАКОС от следующих величин:

- полосы частот приема $\beta_{пн}$ при $B = 30$ дБ, $\alpha_f = 0$ и $\gamma_{в} = 0$;
- относительной расстройки по частоте α_f при $B = 30$ дБ, $\beta_{пн} = 0$ и $\gamma_{в} = 0$;
- базы сигнала B при $\alpha_f = 0$, $\beta_{пн} = 1$ и $\gamma_{в} = 0$;
- относительной расстройки по времени обработки сигналов $\gamma_{в}$ при $B = 30$ дБ, $\alpha_f = 0$ и $\beta_{пн} = 0$.

Зеленая линия на рисунках соответствует отношению мощности сигнала к мощности шумов на входе УАКОС $p = -5$ дБ, синяя линия – $p = 0$ дБ, красная линия – $p = +5$ дБ.)

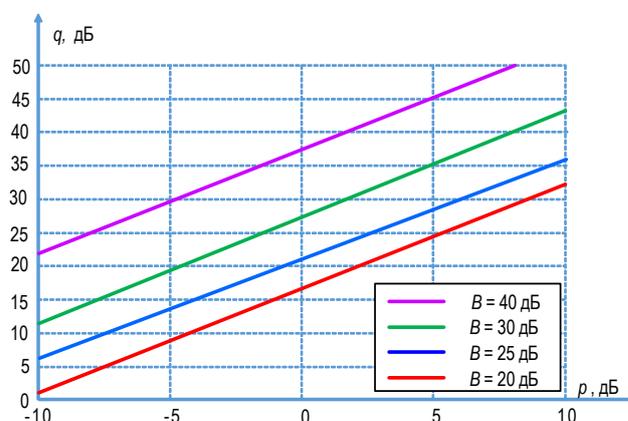


Рис. 5. Зависимости отношения мощности сигнала к мощности шумов на выходе УАКОС от отношения их мощностей на входе

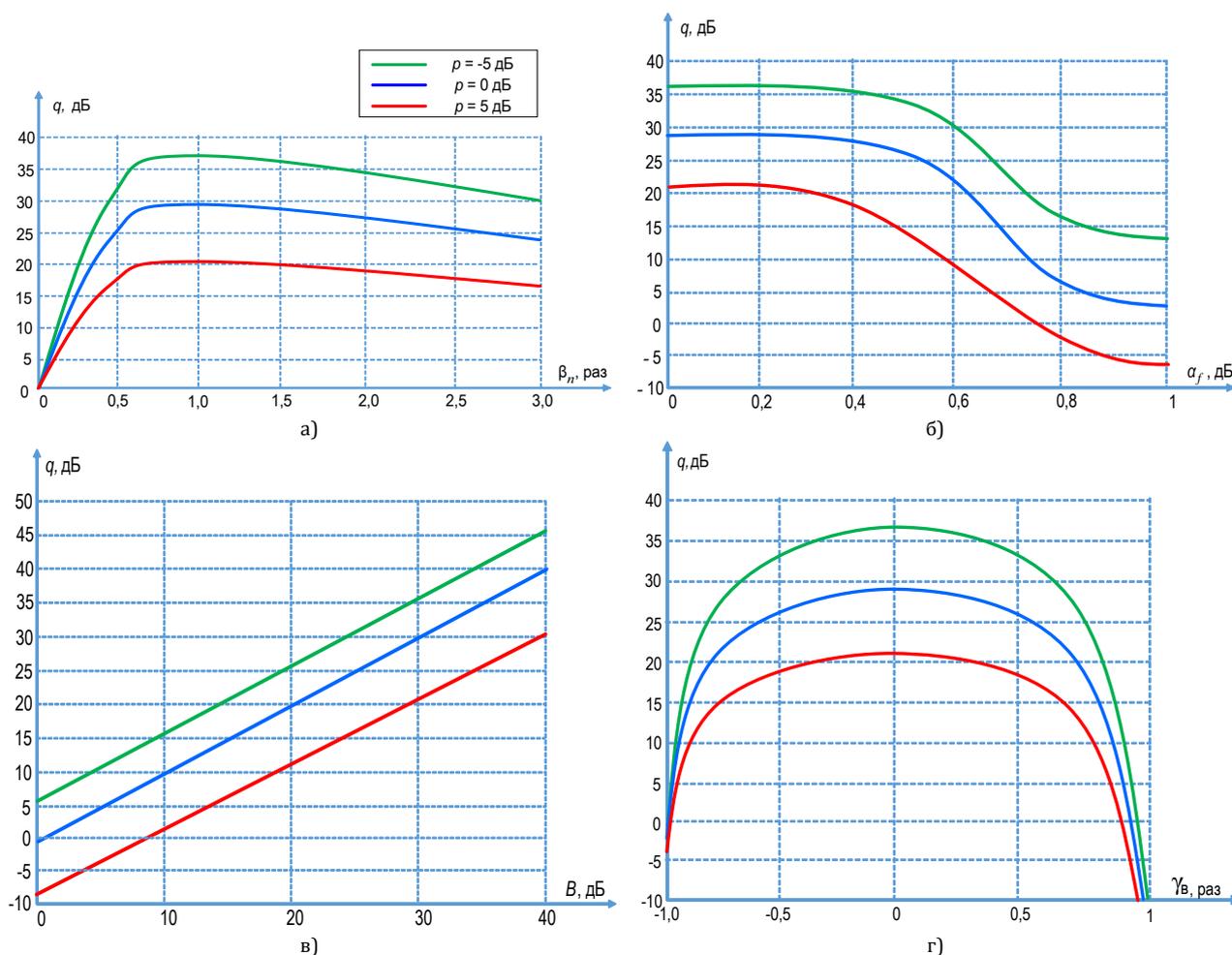


Рис. 6. Зависимости отношения мощности сигнала к мощности шумов на выходе УАКОС от относительной полосы частот приема (а), от относительной расстройки по частоте (б), от базы сигналов (в), от времени обработки сигналов (г)

Анализ полученных зависимостей показывает, что отношения мощности сигнала к мощности шумов на выходе УАКОС при решении задачи обнаружения:

- изменяется по линейному закону прямо пропорционально изменению базы сигналов и отношению мощности сигнала к мощности шумов на входе УАКОС;

- даже при отрицательных отношениях мощности сигнала к мощности шумов на входе приемной системы, применяя УАКОС, можно обеспечить необходимое для эффективного обнаружения сигналов отношение мощности на входе обнаружителя;

- при относительной расстройке сигнала по частоте в диапазоне от 0 до 0,4 наблюдается снижение отношения не более, чем на 3 дБ, а в диапазоне от 0,4 до 1 происходит резкое снижение отношения, которое составляет до 20 дБ;

- возрастает при увеличении относительной полосы частот приема от 0 до 1 и достигает максимального значения при равенстве полосы частот приема полосе частот сигнала, а при дальнейшем увеличении полосы отношение линейно снижается;

- максимально при отсутствии расстройки по времени обработки сигналов. При увеличении относительной расстройки по времени обработки сигналов в диапазоне от 0 до 0,5 наблюдается незначительное снижение, которое не превышает 3 дБ. При дальнейшем увеличении относительной расстройки по времени обработки сигналов до единицы происходит значительное снижение отношения на 35 дБ при запаздывании расстройки и 65 дБ при опережении расстройки по времени.

Таким образом, эффективность УАКОС существенным образом зависит от правильного выбора их параметров. При ведении РМ в условиях априорной информационной неопределенности возникает проблема выбора рациональных параметров УАКОС. На практике для повышения эффективности применяются методы параллельного и последовательного поиска их рациональных параметров в процессе ведения РМ. Последовательный поиск рациональных параметров УАКОС требует больших временных затрат. Параллельный поиск, основанный на многоканальной обработке с выбранным шагом изменения параметра по каждому из оптимизируемых параметров, является более сложным с точки зрения практической реализации [2, 15–20, 24, 25, 28].

С практической точки зрения, применительно к рассматриваемой ситуации наиболее предпочтительным является параллельный метод поиска рациональных параметров УАКОС. С учетом практической возможности технической реализации, а также получения гарантированных оценок скрытности ведения РМ при применении УАКОС, для проведения расчетов примем, что величина относительной расстройки по частоте составляет 0,1, по времени обработки сигналов – 0,1 от максимальной расстройки, относительной полосы частоты приема – 0,5.

С позиции обеспечения скрытности линий связи важнейшим параметром вектора связного сигнала является длительность его излучения, которая применительно к рассматриваемой ситуации должна удовлетворять неравенству [1,2]:

$$T_{из\ сс} < T_{обн}, \quad (11)$$

где $T_{из\ сс}$ – длительность излучения связного сигнала; $T_{обн}$ – время, необходимое для обнаружения сигнала средствами РМ.

При традиционном способе обнаружения сигналов (без применения УАКОС) время, необходимое для обнаружения сигнала, определяется из условия:

$$T_{обн} \geq \frac{1}{\Delta f_c}. \quad (12)$$

При обнаружении сигнала с применением УАКОС время, необходимое для обнаружения сигнала, определяется соотношением:

$$T_{обн} \geq \frac{B}{\Delta f_{пр}}. \quad (13)$$

2. Вычисление параметров системы СпС при условии обеспечения ее скрытности от средств РМ

При проектировании любой системы СпС одной из основных задач является определение параметров приемной и передающей системы соответствующих линий связи. Применительно к рассматриваемой задаче определению подлежат следующие параметры системы связи [1–3, 21–28]:

- скорость передачи информационного сигнала;
- вид первичной модуляции;
- несущая частота связного сигнала;
- коэффициент усиления передающей антенной системы (АС);
- эквивалентная изотропная излучаемая мощность;
- коэффициент усиления приемной АС;
- шумовая температура приемной системы;
- база сигнала.

Перечисленные параметры системы связи, за исключением последнего, предварительно определяются Заказчиком и выдаются в виде исходных данных, которые приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные, принятые при проведении расчетов по уточнению параметров системы СпС с учетом обеспечения требований по скрытности связи

Наименование параметра, ед. изм.	Обозначение параметра	Размещение средства РМ в зоне/вне зоны освещенности главного лепестка ДН передающей АС КА
Высота орбиты, км	$h_{ор}$	35875
Диапазон рабочих частот передачи КА, ГГц	D_f	36,650...36,850
Несущая частота сигнала, ГГц	f_c	36,75
Максимальная полоса частот передачи, МГц	$\Delta F_{пер}$	200
Дополнительное затухание сигнала на трассе распространения «КА – ЗС/БЛА», дБ	$L_{д\ КА - ЗС/БЛА}$	12
Дополнительное затухание сигнала на трассе распространения «КА – РМ», дБ	$L_{д\ КА - РМ}$	10
Скорость передачи информационного сигнала, кбит/с	$V_{КА}$	6; 12; 96
База сигнала, дБ: – для $V_{КА} = 6$ кбит/с; – для $V_{КА} = 12$ кбит/с; – для $V_{КА} = 96$ кбит/с	B	45; 42; 33
Вид модуляции	–	QPSK
Коэффициент усиления передающей АС КА, дБ	$G_{пер\ КА}$	42,27
Эквивалентная изотропно излучаемая мощность, дБВт	$E_{КА}$	не менее 38
Коэффициент усиления приемной АС ЗС/БЛА, дБ	$G_{пр\ ЗС/БЛА}$	49,7
Шумовая температура приемной системы средства ЗС/БЛА, °К	$T_{пр\ ЗС/БЛА}$	200
Вероятность ошибочного приема на бит информации	BER	10^{-6}
Пороговое отношение сигнал/ шум при BER = 10^{-6} , дБ	$q_{пор}$	6
Угол визирования АС КА на АС РМ, градус	$\theta_{РМ}$	1,12 / 3; 5; 10
Коэффициент усиления приемной АС средства РМ, дБ	$G_{пр\ РМ}$	60
Шумовая температура приемной системы средства РМ, °К	$T_{пр\ РМ}$	100
Требуемая вероятность правильного обнаружения	$P_{обн\ тр}$	0,1
Пороговое отношение мощности сигнала к мощности шумов, при которой обеспечивается требуемая эффективность обнаружения, дБ	$q_{пор\ обн}$	3
Вероятность ложной тревоги	$P_{лт}$	10^{-3}
Относительная полоса частоты приема	$\beta_{п}$	1/1
Относительная расстройка несущей частоты средства РМ, раз	α_f	0,1/0,1
Относительная расстройка по времени обработки сигналов средства РМ, раз	$\gamma_{в}$	0,1/0,1

Однако при их определении не учитываются требования по обеспечению скрытности связи – возможности «третьей стороны» по обнаружению сигналов источника излучения. На данном этапе исследований требуется уточнить определенные ранее параметры системы с учетом обеспечения требований по скрытности [1].

В таблице 1 также приведены необходимые для проведения этих расчетов исходные данные, определяющие:

- параметры трасс распространения сигналов «КА – ЗС/БЛА» и «КА – средство РМ»;
- местоположение средств СпС и средств РМ;
- методы ведения РМ;
- параметры средств РМ.

При задании этих данных необходимо учитывать:

- получение гарантированных оценок, как функционирования системы, так и средств РМ;
- получение оценок для различных типовых вариантов размещения средств РМ;
- возможность применения для организации СпС как простых, так и сложных сигналов;
- возможность использования для обнаружения сигналов как традиционных методов, так и с применением УАКОС.

При определении исходных данных для расчета линий СпС следует исходить из того, что параметры приемной и передающей системы полностью согласованы и находятся в частотной и временной синхронизации. При определении исходных данных для расчета эффективности функционирования для получения гарантированных оценок по скрытности линий СпС, будем полагать, что осуществляющий мониторинг выберет наиболее рациональные в соответствующей ситуации параметры аппаратуры РМ [1–5].

Проведение таких расчетов должно базироваться на комплексном подходе, который предполагает учет всех параметров и ограничений, обеспечивающих как требования по эффективности функционирования системы СпС, так и по ее скрытности от средств РМ. В основе этих расчетов положены описательные модели функционирования всех элементов системы. Алгоритм, реализующий комплексный подход к расчету параметров системы СпС, при условии обеспечения ее скрытности, представлен на рисунке 7.

В соответствии с данным алгоритмом, при использовании исходных данных, представленных в таблице 1, представляется возможным ещё на этапе аванпроекта (проведения предконтрактных работ) определить потенциальную скрытность проектируемой системы СпС с учетом возможностей стороны, осуществляющей мониторинг. При этом количественным критерием скрытности выступает вероятность обнаружения сигнала средства РМ.

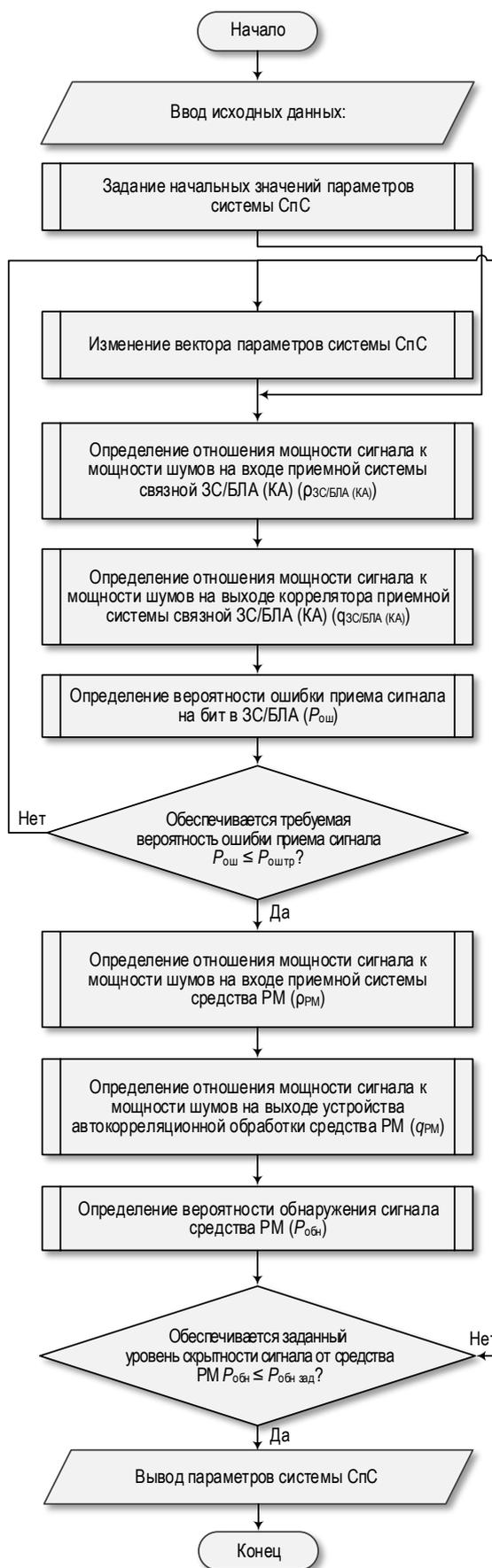


Рис. 7. Алгоритм расчета параметров системы СпС при условии обеспечения ее скрытности

Кроме того, в таблице 1 представлены требования по эффективности функционирования системы СпС и средств РМ. Для сравнения эффективности системы СпС при различных вариантах построения обнаружителей средств РМ и их размещения целесообразно использовать соответствующие энергетические критерии. При проектировании систем СпС в качестве энергетических критериев применяются пороговые отношения мощности сигнала к мощности шумов на входе демодулятора и обнаружителя, для которых обеспечивается требуемая вероятность ошибки приема сигнала и заданная вероятность обнаружения сигнала, соответственно. На основе сравнения полученного расчетного отношения мощности сигнала к мощности шумов на входе демодулятора и обнаружителя с заданным порогом можно судить об эффективности анализируемого варианта.

Для принятых исходных данных (см. таблицу 1), в соответствии с алгоритмом (см. рисунок 7) были проведены расчеты отношений мощности сигнала к мощности шумов на входе приемной системы ЗС и средства РМ, которые представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчетов отношений мощности сигнала к мощности шумов на входе приемной системы ЗС и средства РМ

Скорость передачи связанного сигнала, кбит/с (база сигнала, дБ)	Отношение мощности сигнала к мощности шумов на входе приемной системы ЗС/БЛА, дБ	Отношение мощности сигнала к мощности шумов на входе обнаружителя средства РМ, дБ				
		В главном луче	При угле визирования АС КА на АС РМ, градус			
			3	5	10	
<i>Для варианта простого связанного сигнала и обнаружителя без УАКОС</i>						
6	27,6	39,9	17,9	10,9	2,9	
12	24,6	36,9	14,9	7,9	-0,1	
96	15,6	27,88	5,88	-1,12	-9,12	
<i>Для варианта сложного связанного сигнала и обнаружителя без УАКОС</i>						
6 (B = 45)	-17,4	-5,1	-27,1	-34,1	-42,1	
12 (B = 42)	-20,4	-8,1	-30,1	-37,1	-45,1	
96 (B = 33)	-29,4	-17,1	-39,1	-46,1	-54,1	

В таблице 2 выделены графы с сочетанием параметров сигналов и аппаратуры РМ, которые согласно исходным данным таблицы 1 можно обнаружить без применения автокорреляционной обработки (пороговое отношение обнаружения больше 3 дБ). Остальные комбинации характеристик обнаружению по заявленным критериям не подлежат.

Применение УАКОС значительно улучшает эффективность РМ. В таблице 3 приведены расчетные характеристики времени обнаружения сигналов независимо от его базы для различных вариантов размещения средств РМ.

ТАБЛИЦА 3. Требуемые для эффективного обнаружения сигналов параметры УАКОС и обнаружителя при различных вариантах размещения средств РМ

Наименование параметра	Варианты размещения средств РМ			
	В главном луче	При угле визирования АС КА на АС РМ, градус		
		3	5	10
Эквивалентная база УАКОС, дБ	14	57	71	87
Время обнаружения, с	$1,25 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-3}$	0,063	2,5

Необходимо отметить, что расчеты эквивалентной базы и требуемого времени обнаружения сигналов проводились из условия получения гарантированных оценок скрытности связи в предположении, что полоса пропускания УАКОС согласована с шириной спектра связанного широкополосного сигнала с фазовой манипуляцией [8,12]. В условиях априорной информационной неопределенности о параметрах сигналов это условие невыполнимо без применения дополнительного поиска по полосе приема.

Реализация методов последовательного поиска приведет к дополнительному увеличению требуемого времени обнаружения сигналов. При параллельном поиске потребуются дополнительное увеличение эквивалентной базы сигнала, что также приведет к увеличению требуемого времени обнаружения сигналов.

Заключение

1) Применение УАКОС значительно улучшает эффективность ведения РМ, что особенно актуально при отрицательных отношениях мощностей полезного сигнала и шумов на входе устройств автокорреляционной обработки сигналов.

2) Эффективность функционирования УАКОС существенно зависит от правильного выбора параметров. В этом случае на практике целесообразно применять апробированные методы параллельного и последовательного поиска их рациональных параметров непосредственно в ходе ведения РМ.

3) Рассмотренные в данной статье подходы к ведению РМ, а также полученные расчетные значения и графические зависимости имеют строго практическую направленность, заключающуюся в выявлении принципиальной возможности при формировании Технического задания на комплексы средств СпС в обеспечение функционирования комплексов с БЛА учесть сигнально-энергетические параметры радиолинии СпС не только для обеспечения требований по скорости передачи данных в информационном канале и помехоустойчивости в командно-телеметрическом канале, но также и для скрытности ее функционирования на предмет возможности ведения РМ со стороны «третьих лиц».

Список используемых источников

1. Егоров А.Т., Ломакин А.А., Пантенков Д.Г. Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Часть 1 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 3. С. 19–26. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-3-19-26
2. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М: Радиотехника, 2003. 400 с.
3. Долженков Н.Н., Абрамов А.В., Егоров А.Т., Ломакин А.А., Пантенков Д.Г. Бортовой терминал радиосвязи беспилотного летательного аппарата. Патент на полезную модель RUS 191165 от 26.07.2019. Бюл. № 21.
4. Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Ларин В.К. Информационное обеспечение управления космическими аппаратами. Системный подход к решению задач. М.: Радиотехника, 2019. 272 с. DOI:10.18127/B9785931081854
5. Тестоедов Н.А., Косенко В.Е., Выгонский Ю.Г., Кузовников А.В., Мухин В.А., Чеботарев В.Е. и др. Космические системы ретрансляции. М.: Радиотехника, 2017. 448 с.
6. Бузов А.Л., Букашкин С.А. Специальная радиосвязь. Развитие и модернизация оборудования и объектов. М.: Радиотехника, 2017. 448 с.
7. Кузовников А.В. и др. Современные технологии радиомониторинга в спутниковых системах связи и ретрансляции. М.: Радиотехника, 2015. 214 с.
8. Журавлев В.И., Руднев А.Н. Цифровая фазовая модуляция. М.: Радиотехника, 2012. 208 с.
9. Немировский М.С., Локшин Б.А., Аронов Д.А. Основы построения систем спутниковой связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2017. 432 с.
10. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П. Компьютерное моделирование передачи полезной информации в спутниковых радиолиниях при многолучевой связи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 3-1. С. 127–131.
11. Великоиваненко В.И., Гусаков Н.В., Донченко П.В., Ломакин А.А., Пантенков Д.Г., Соколов В.М. Система спутниковой связи с последовательным зональным обслуживанием // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 2(75). С. 48–56.
12. Литвиненко В.П., Глушков А.Н., Пантенков Д.Г. Некогерентный цифровой демодулятор «в целом» кодированных сигналов с фазовой манипуляцией. Патент на изобретение RUS 2556429 от 14.07.2014. Опубл. 10.07.2015. Бюл. № 19.
13. Вейко А.В., Великоиваненко В.И., Ломакин А.А. и др. Методический подход оценки компенсации доплеровского смещения частоты в спутниковых линиях информационного обмена при эксплуатации космических систем связи // Проблемные вопросы развития наземных комплексов, стартового оборудования и эксплуатации летательных аппаратов. 2018. № 13. С. 289–297.
14. Иванкин Е.Ф. Информационные системы с апостериорной обработкой результатов наблюдений. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 168 с.
15. Лепин В.Н. Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием. М.: Радиотехника, 2017. 416 с.
16. Рудой В.М. Системы передачи информации: учебное пособие. М.: Радиотехника, 2007. 280 с.
17. Ярлыкова М.С. Марковская теория оценивания в радиотехнике. М.: Радиотехника, 2004. 505 с.
18. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Моделирование информационных систем. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
19. Верба В.С., Татарский Б.Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х книгах. М.: Радиотехника, 2016. 1352 с.
20. Дворников С.В., Духовницкий О.Г. Оценка помехозащищенности профессионального радионавигационного оборудования системы ГЛОНАСС // Информация и космос. 2015. № 4. С. 73–77.
21. Агиевич С.Н., Луценко С.А. Оценка помехоустойчивости спутниковых систем радиосвязи с фазоманипулированными широкополосными сигналами // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические вопросы противодействия терроризму. 2018. № 123-124. С. 132–137.
22. Долженков Н.Н., Пантенков Д.Г., Егоров А.Т., Ломакин А.А., Литвиненко В.П., Великоиваненко В.И., Лю-Кэ-Сю Е.Ю. Технические характеристики комплекса средств спутниковой радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 74–82.
23. Долженков Н.Н., Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П., Ломакин А.А., Егоров А.Т., Гриценко А.А. Интегрированный комплекс дальней радиосвязи для повышения эффективности решения целевых задач беспилотными летательными аппаратами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 102–108. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.3.015
24. Дятлов А.П. Корреляционная обработка широкополосных сигналов в автоматизированных комплексах радиомониторинга. М.: ГЛТ, 2013. 332 с.
25. Киселев Д.Н. Радиомониторинг и распознавание радиоизлучений: Учебное пособие для вузов. М.: РиС, 2015. 90 с.
26. Пантенков Д.Г. Результаты анализа наземных испытаний комплекса средств спутниковой радиосвязи для беспилотных летательных аппаратов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, 2019. № 69. С. 42–51.
27. Пантенков Д.Г., Гусаков Н.В., Егоров А.Т., Ломакин А.А., Литвиненко В.П., Великоиваненко В.И. и др. Техническая реализация высокоскоростного информационного канала радиосвязи с беспилотного летательного аппарата на наземный пункт управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 5. С. 52–71.
28. Пестряков В.Б., Кузнецов В.Д. Радиотехнические системы. М.: Радио и связь, 1985.

* * *

MATHEMATICAL MODELS OF SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES AND COUNTER-MEANS OF RADIO CONTROL. PART 2

A. Lomakin¹, D. Pantenkov¹, V. Sokolov²

¹JSC Kronstadt,
Moscow, 115432, Russian Federation

²PAO S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia,
Moscow region, Korolev, 141070, Russian Federation

Article info

The article was received 18th April 2019

For citation: Lomakin A., Pantenkov D., Sokolov V. Mathematical Models of Satellite Communication Systems with Unmanned Aerial Vehicles and Counter-Means of Radio Control. Part 2. 2019;5(4):37–48. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-4-37-48>

Abstract: *The article is devoted to the issues of stealth satellite radio channels with unmanned aerial vehicles (UAV) and it consists of two parts. In the first part of this article the following questions are considered: the general statement of a system development problem of satellite model communication providing its stealth functioning by means of radio monitoring is carried out; the mathematical apparatus for the assessing the effectiveness of ensuring spatial selectivity in the organization of satellite communication lines at hidden objects of their functioning is presented; the functioning model of the satellite communication system which use the signal processing methods to ensure the secrecy of its functioning by means of radio monitoring is developed; in the conclusion, proposals and recommendations are formulated to ensure the secrecy of the satellite radio channel with unmanned aerial vehicles. Since the eventual opponent a priori lacks complete reliable information about the radio monitoring signal, the second part of the article considers the methods of quasi-optimal signal processing based on auto- and intercorrelation processing, which allows to obtain a significant energy gain and detect a useful signal even at a very low level of its power at the input. The use of autocorrelation signal processing devices significantly improves the efficiency of radio monitoring (RM), which is especially important in the case of negative ratios of useful signal power and noise at the input of autocorrelation signal processing devices. The main results of the second part of the article include: a mathematical functioning model of the opponent's RM means in the conditions of taking measures to ensure the information transfer secrecy, the parameters calculations results of the satellite system provided that it is hidden from the RM means.*

Keywords: *complexes with unmanned aerial vehicles, satellite radio communication system, improving the efficiency of the unmanned aerial vehicle, radio monitoring, mathematical modeling, noise immunity, stealth satellite radio line, the device of the autocorrelation signal processing.*

References

1. Egorov A., Lomakin A., Pantenkov D. Mathematical Models of Satellite Communication Systems with Unmanned Aerial Vehicles and Counter-Means of Radio Control. Part 1. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(3):19–26. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-3-19-26>
2. Perov A.I. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem* [Statistical Theory of Radio Systems]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2003. 400 p. (in Russ.)
3. Dolzhenkov N.N., Abramov A.V., Egorov A.T., Lomakin A.A., Pantenkov D.G. *Bortovoi terminal radiosviazi bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Unmanned Aerial Vehicle Radio Terminal]. Patent RF no. 191165, 26.07.2019 (in Russ.)
4. Tiulin A.E., Betanov V.V., Larin V.K. *Informatsionnoe obespechenie upravleniya kosmicheskimi apparatami. Sistemnyi podkhod k resheniiu zadach* [Information Support for Spacecraft Control. A Systematic Approach to Solving Problems]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2019. 272 p. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.18127/B9785931081854>
5. Testoedov N.A., Kosenko V.E., Vygonskii Iu.G., Kuzovnikov A.V., Mukhin V.A., Chebotarev V.E., et al. *Kosmicheskie sistemy retranslyatsii* [Space Relay Systems]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2017. 448 p. (in Russ.)

6. Buzov A.L., Bukashkin S.A. *Spetsialnaia radiosviyaz Razvitie i modernizatsiia oborudovaniia i obiektov* [Special Radio Communication. Development and Modernization of Equipment and Facilities]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2017. 448 p. (in Russ.)
7. Kuzovnikov A.V., et al. *Sovremennye tekhnologii radiomonitoringa v sputnikovykh sistemakh svyazi i retransliatsii* [Modern Technologies of Radio Monitoring in Satellite Communication Systems and Relaying]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2015. 214 p. (in Russ.)
8. Zhuravlev V.I., Rudnev A.N. *Tsifrovaia fazovaia moduliatsiia* [Digital Phase Modulation]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2012. 208 p. (in Russ.)
9. Nemirovskii M.S., Lokshin B.A., Aronov D.A. *Osnovy postroeniia sistem sputnikovoi svyazi* [Basics of Building Satellite Communications Systems]. Moscow: Goriachaia Liniia – Telekom; 2017. 432 p. (in Russ.)
10. Pantenkov D.G., Litvinenko V.P. Computer modeling of the transmission of useful information in the satellite radio links with multipath communication. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2013;9(63–1):127–131. (in Russ.)
11. Velikoivanenko V.I., Gusakov N.V., Donchenko P.V., Lomakin A.A., Pantenkov D.G., Sokolov V.M. Satellite Communication System with Consistent Zone Service. *Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2014;2(75):48–56. (in Russ.)
12. Litvinenko V.P., Glushkov A.N., Pantenkov D.G. *Non-Coherent Digital Demodulator of "Integrally" Coded Phase-Shift Keyed Signals*. Patent RF, no. 2556429, 14.07.2014 (in Russ.)
13. Veiko V.A., Velikoivanenko V.I., Lomakin A.A., et al. Methodical approach of estimation of compensation of Doppler frequency offset in the satellite lines of information exchange in the operation of space communication systems. *Problems of development of ground complexes, starting equipment and operation of aircraft*. 2018;13:289–297. (in Russ.)
14. Ivankin E.F. *Informatsionnye sistemy s aposteriornoi obrabotkoi rezultatov nabliudeniia* [Information Systems with a Posteriori Processing of Observation Results]. Moscow: Goriachaia Liniia – Telekom; 2008. 168 p. (in Russ.)
15. Lepin V.N. *Pomekhozashchita radioelektronnykh sistem upravleniia letatelnykh apparatami i oruzhiem* [Noise Protection of Radio Electronic Control Systems of Aircraft and Weapons]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2017. 416 p. (in Russ.)
16. Rudoy V.M. *Sistemy peredachi informatsii uchebnoe posobie* [Information Transmission Systems]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2007. 280 p. (in Russ.)
17. Yarlukov M.S. *Markovskaia teoriia otsenivaniia v radiotekhnike* [Markov's Theory of Estimation in Radio Engineering]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2004. 505 p. (in Russ.)
18. Shelukhin O.I., Teniakhev A.M., Osin A.V. *Modelirovanie informatsionnykh sistem* [Modeling of Information Systems]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2005. 368 p. (in Russ.)
19. Verba V.S., Tatarsky B.G. *Kompleksy s bespilotnymi letatelnykh apparatami* [Complexes with Unmanned Aerial Vehicles in 2 Books]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2016. 1352 p. (in Russ.)
20. Dvornikov S.V., Dukhovnitsky O.G. Otsenka pomekhozashchishchennosti professionalnogo radionavigatsionnogo oborudovaniia sistemy Glonass [The Estimation of Noise Immunity of Professional Navigation Equipment GLONASS]. *Informatsiia i kosmos*. 2015;4:73–77. (in Russ.)
21. Agievich S.N., Lutsenko S.A. Estimation of noise immunity of satellite radio communication systems with Phase-Manipulated Broadband Signals. *Military Enginery. Issue 16. Counter-terrorism technical devices*. 2018;123–124:132–137. (in Russ.)
22. Dolzhenkov N.N., Pantenkov D.G., Egorov A.T., Lomakin A.A., Litvinenko V.P., Velikoivanenko V.I., Lu-Ke-Syu E.Yu. Technical Characteristics of the Means for Satellite Radiocommunication with Unmanned Aerial Vehicles. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2019;15(3):74–82. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.3.011>
23. Dolzhenkov N.N., Pantenkov D.G., Litvinenko V.P., Lomakin A.A., Egorov A.T., Gritsenko A.A. Integrated Complex of the Long-Distance Radiocommunication for Increase Efficiency of the Solution of Target Tasks by Unmanned Vehicle. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2019;15(3):102–108. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.3.01>
24. Dyatlov A.P. *Korrelatsionnaya obrabotka shirokopolosnykh signalov v avtomatizirovannykh kompleksakh radiomonitoringa* [Correlation Processing of Broadband Signals in Automated Radio Monitoring Complexes]. Moscow: GLT Publ.; 2013. 332 p. (in Russ.)
25. Kiselev D.N. *Radiomonitoring i raspoznavanie radioizluchenii: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Radio Monitoring and Recognition of Radio Emissions]. Moscow: RIS Publ.; 2015. 90 p. (in Russ.)
26. Pantenkov D.G. Rezultaty analiza nazemnykh ispytaniia kompleksa sredstv sputnikovoi radiosvyazi dlya bespilotnykh letatelnykh apparatov [Results of the Analysis of Ground Tests of the Satellite Radio Communication Complex for Unmanned Aerial Vehicles]. *Bulletin of the Ryazan state radio engineering University*. 2019;69:42–51. (in Russ.)
27. Pantenkov D.G., Gusakov N.V., Egorov A.T., Lomakin A.A., Litvinenko V.P., Velikoivanenko V.I., et al. Tekhnicheskaya realizatsiia vysokoskorostnogo informatsionnogo kanala radiosvyazi s bespilotnogo letatel'nogo apparata na nazemnyi punkt upravleniia [Technical Implementation of High-Speed Information Channel of Radio Communication from Unmanned Aerial Vehicle to Ground Control Point]. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2019;15(5):52–71. (in Russ.)
28. Pestryakov V.B., Kuznetsov V.D. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio Engineering Systems]. Moscow: Radio i svyaz Publ.; 1985. (in Russ.)