

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ СКРЫТНОСТИ СПУТНИКОВЫХ КАНАЛОВ РАДИОСВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ. ЧАСТЬ 1

А.Т. Егоров¹, А.А. Ломакин¹, Д.Г. Пантенков^{1*}

¹АО «Кронштадт»,
Москва, 115432, Российская Федерация

*Адрес для переписки: pantenkov88@mail.ru

Информация о статье

УДК 621.399

Статья поступила в редакцию 18.04.2019

Ссылка для цитирования: 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

Аннотация: В настоящее время спутниковая радиосвязь является основным видом радиосвязи применительно к большинству подвижных объектов специального назначения, в том числе к беспилотным летательным аппаратам (БЛА) тяжелого и сверхтяжелого классов большой продолжительности полета, которые при выполнении поставленных целевых задач вынуждены перемещаться относительно места взлета (аэродрома) на значительные расстояния (до нескольких тысяч километров). При этом актуальным становится вопрос качества канала спутниковой линии радиосвязи на всем ее участке между передающим и приемным устройствами, в том числе обеспечения помехозащищенности и скрытности передачи командно-телеметрической и целевой информации. Одновременно необходимо учесть возможность использования средств радиомониторинга спутникового канала радиосвязи, что может привести к перехвату канала управления или доступу к целевой информации от полезных нагрузок БЛА. В данной статье, состоящей из двух частей, рассмотрены способы повышения эффективности передаваемой информации по спутниковым каналам радиосвязи между БЛА и наземным пунктом управления и обработки информации, а также противодействия средствам радиомониторинга, сформулированы предложения и рекомендации по повышению скрытности спутниковых каналов передачи данных.

Ключевые слова: комплексы с беспилотными летательными аппаратами, система спутниковой радиосвязи, космический аппарат, повышение эффективности функционирования, средства радиомониторинга, математическое моделирование, помехозащищенность, скрытность спутниковой радиолинии, сигнально-энергетические параметры.

Введение

В настоящее время в РФ активно развивается беспилотная авиация в интересах различных Заказчиков: по состоянию на 2019 год отечественной промышленностью разработан типоряд комплексов с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) различного класса и целевого назначения – легкие («Типчак», «Zala 421-04М», «Элерон-3»), средние («Элерон-10», «Форпост», «Корсар»), тяжелые («Орион»), сверхтяжелые («Альтаир», «Охотник»), которые решают как задачи повышения обороноспособности и безопасности РФ, так и отвечают интересам гражданских потребителей. Одним из ключевых элементов комплексов с БЛА является

радиолиния с использованием космических аппаратов (КА) на различных орбитах (загоризонтная радиосвязь), что позволяет существенно повысить эффективность применения комплексов с БЛА при решении поставленных целевых задач за счет увеличения радиуса его действия [1–16].

В данной статье представлены методы пространственной избирательности и сигнальной обработки при передаче полезной (целевой) информации между БЛА и земными станциями спутниковой связи (ЗС СпС) из состава наземного пункта управления и обработки информации, проведена оценка влияния этих методов обеспечения скрытности на эффективность функционирования системы СпС и

средств радиомониторинга (РМ). Следует отметить, что в целях упрощения (но без ущерба для понимания) в статье сделано допущение, что скрытность несимметричного дуплексного канала спутниковой радиосвязи БЛА учитывает только сигнально-энергетические параметры сигнально-кодовых конструкций, без учета типа и параметров кодирования.

Известен ряд работ по данной или смежной тематикам [17–19], в которых рассматриваются вопросы помехозащищенности спутниковых систем связи и навигации, приведены оценки влияния широкополосных заградительных, узкополосных и сосредоточенных по спектру помех на эти системы, уделено значительное внимание вопросам помехоустойчивого кодирования. При этом не в полной мере рассматриваются вопросы оптимальной обработки сигналов – согласованной фильтрации и корреляционной обработки, что гипотетически позволяет существенным образом повысить отношение сигнал/шум на входе приемника, а также не учитывается возможность постановки помех по боковому и заднему лепестку диаграммы направленности полезного сигнала.

1. Общая постановка задачи разработки модели системы спутниковой связи, обеспечивающая ее скрытное функционирование от средств радиомониторинга

С математической точки зрения функционирование такой системы можно рассматривать как взаимодействие двух антагонистических систем. Целью непосредственно самой системы СпС является обеспечение заданного качества передаваемой информации от БЛА/земной станции на КА-ретранслятор и от КА-ретранслятора на земную станцию/БЛА при условии скрытности ее передачи от средств РМ. В свою очередь, целью системы РМ является обнаружение сигналов спутниковой связи [7–8]. В самом общем виде функционирование системы СпС, скрытой от системы РМ [1–6], представлено на рисунке 1.

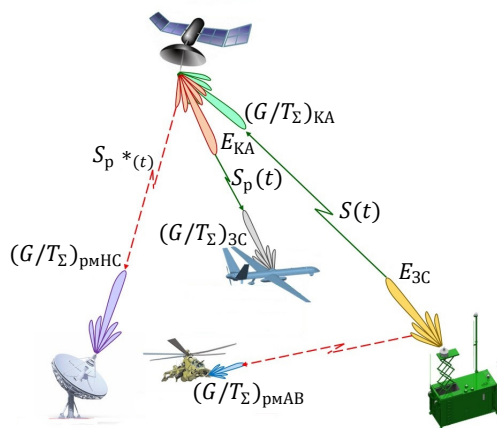


Рис. 1. Функционирование системы СпС, обеспечивающей скрытую передачу сигналов от системы радиомониторинга

На практике качество передачи информации в системах радиосвязи оценивается вероятностью ошибочного приема элементарной посылки (или кодовой комбинации) [5]:

$$P_{\text{ош}} = f(q_{\text{вх сс}}, \vec{W}), \quad (1)$$

где $q_{\text{вх сс}}$ – отношение мощности принимаемого сигнала к мощности шумов на входе приемной системы (далее по тексту – $q_{\text{вх}}$) ЗС; $\vec{W}$ – вектор параметров принимаемого сигнала СпС, включая параметры модуляции (демодуляции) и кодирования (декодирования).

Для системы РМ одной из основных задач является обнаружение сигналов от объектов мониторинга. При этом эффективность ее решения определяется вероятностью обнаружения сигнала [3, 5]:

$$P_{\text{обн}} = f(P_{\text{лт}}, q_{\text{вх РМ}}, M_s), \quad (2)$$

где $P_{\text{лт}}$ – вероятность ложной тревоги, которая при решении задачи энергетического обнаружения сигнала определяет порог обнаружения; M_s – параметр, определяющий модель обнаруживаемого сигнала на входе обнаружителя (сигнал со случайной начальной фазой или сигнал со случайной амплитудой и начальной фазой); $q_{\text{вх РМ}}$ – $q_{\text{вх}}$ для РМ:

$$q_{\text{вх РМ}} = \frac{P_{\text{с вх РМ}}}{P_{\text{ш РМ}}}.$$

Одним из параметров, определяющих эффективность задач как приема связного сигнала, так и РМ, является вышеобозначенное $q_{\text{вх}}$ [7–10]:

$$q_{\text{вх сс}} = \frac{P_{\text{с вх ЗС}}}{P_{\text{ш пр}}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{с вх ЗС}}$ – мощность принимаемого сигнала на входе приемной системы; $P_{\text{ш пр}}$ – мощность шумов приемной системы.

При этом в общем случае мощность сигнала на входе приемной системы $P_{\text{с вх ЗС(КА)}}$ ЗС или КА, наземной или авиационной станции РМ, является функцией от целого ряда факторов:

$$P_{\text{с вх ЗС}} = f(E(\alpha, \beta), G_{\text{пр}}, L_{\Sigma}) \quad (4)$$

где $E(\alpha, \beta)$ – эквивалентная изотропная мощность, излучаемая источником связного сигнала ЗС или КА-ретранслятором в направлении (α, β) на ЗС или на КА, на наземную или авиационную станции РМ; $G_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления приемной антенны ЗС или КА, авиационной или наземной станции РМ; L_{Σ} – суммарные потери сигнала на трассе распространения «ЗС-КА» или «КА-ЗС», «ЗС-АВ РМ» (авиационная станция радиомониторинга) или «КА-НС РМ» (наземная станция радиомониторинга).

Мощность шумов на входе приемной системы в общем случае определяется по формуле [7–10]:

$$P_{\text{ш пр}} = k_{\text{Б}} \cdot T_{\Sigma \text{ ш}} \cdot \Delta F_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где k_B – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ (Дж/К); $T_{\Sigma \text{ Ш}}$ – суммарная шумовая температура приемной системы ЗС или КА, наземной или авиационной станции РМ, включая шумы антенны и входного приемного тракта (К); $\Delta F_{\text{пр}}$ – полоса пропускания приемного тракта (Гц).

Известно, что основная задача при проектировании любой системы связи заключается в синтезе (обосновании и выборе) параметров связного сигнала, методов его обработки, определении параметров приемного и передающего трактов, при которых обеспечивается качество передачи информации не хуже заданного ($P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош тр}}$). Очевидно, что для выполнения этого условия мощность связного сигнала на входе приемной системы должна быть максимально большой.

С другой стороны, в условиях ведения РМ за средствами СпС необходимо обеспечить вероятность обнаружения сигнала станцией РМ не больше заданной величины ($P_{\text{обн}} \leq P_{\text{обн зад}}$). При этом, мощность связного сигнала на входе приемной системы наземной станции РМ должна быть минимальной [7–10].

В данной ситуации при одном источнике излучения связного сигнала наблюдается противоречие в требованиях к мощности связного сигнала, которая для обеспечения качественной связи должна быть максимально большой на входе ЗС СпС, а в интересах обеспечения скрытности от средств мониторинга – минимальной на входе наземной станции РМ.

Анализ известных методов разрешения такого рода противоречий показывает, что решение задачи синтеза применительно к рассматриваемой ситуации возможно за счет применения метода пространственной избирательности и метода сигнальной обработки [4–11]. Далее проведем оценку влияния этих методов обеспечения скрытности на эффективность функционирования системы СпС и средств РМ.

2. Оценка эффективности мер обеспечения пространственной избирательности при организации линий спутниковой связи на скрытность их функционирования от средств радиомониторинга

Косвенными показателями эффективности функционирования системы СпС и средств РМ является отношение мощностей связного сигнала и шумов на входе приемных систем станций СпС и средств РМ соответственно [9–14], которые определяются на основе энергетических расчетов линий:

- при обеспечении связи на направлениях «КА-ЗС» и «ЗС-КА»;
- при ведении РМ на направлениях «КА-СРМ» (средство радиомониторинга) и «ЗС-СРМ».

Проведение энергетических расчетов этих линий основано на применении уравнения радиосвязи.

Отношение мощности связного сигнала к мощности шумов на входе приемной системы ЗС или КА определяется по формуле [5,6]:

$$\left(\frac{P_C}{P_{\text{Ш}}}\right) = \frac{P_{\text{пер КА(ЗС)}} \cdot G_{\text{пер КА(ЗС)}} \cdot \eta_{\text{пер КА(ЗС)}}}{L_{\Sigma \text{ ЗС-КА}} \cdot k_B} \times \frac{G_{\text{пр ЗС(КА)}} \cdot \eta_{\text{пр ЗС(КА)}}}{T_{\Sigma \text{ Ш ЗС(КА)}} \cdot \Delta F_{\text{пр ЗС(КА)}}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{пер КА(ЗС)}}$ – выходная мощность передатчика КА или ЗС соответственно (Вт); $G_{\text{пер КА(ЗС)}}$ – коэффициент усиления передающей антенны (раз); $\eta_{\text{пер КА(ЗС)}}$ – коэффициент передачи по мощности волноводного (фидерного) тракта передающей системы (раз); $G_{\text{пр ЗС(КА)}}$ – коэффициент усиления приемной антенны (раз); $\eta_{\text{пр ЗС(КА)}}$ – коэффициент приема по мощности волноводного (фидерного) тракта приемной системы (раз); $L_{\Sigma \text{ ЗС-КА}}$ – суммарные потери на трассе распространения «ЗС-КА» (раз); $T_{\Sigma \text{ Ш ЗС(КА)}}$ – суммарная шумовая температура приемной системы (К°); $\Delta F_{\text{пр ЗС(КА)}}$ – полоса пропускания приемной системы (Гц).

Выражение (6) получено для линии СпС при выполнении следующих условий:

- приемная и передающая антенные системы наведены друг на друга по максимуму принимаемого сигнала;
- поляризация приемной и передающей антенн совпадают;
- полоса пропускания приемной системы согласована со спектром принимаемого сигнала.

В большинстве случаев средства РМ располагаются вне зоны освещенности главного лепестка передающей антенны наблюдаемого средства связи. В этом случае прием связного сигнала средствами РМ возможен по боковым лепесткам диаграммы направленности передающей антенны источника сигнала, что приводит к его ослаблению относительно усиления в главном лепестке.

Отношение мощности связного сигнала к мощности шумов на входе приемной системы средства РМ наземного или воздушного базирования определяется по формуле:

$$\left(\frac{P_C}{P_{\text{Ш}}}\right)_{\text{вх НСрм(АСрм)}} = \frac{P_{\text{пер КА(ЗС)}} \cdot G_{\text{КА-ЗС}} \cdot \eta_{\text{пер КА(ЗС)}}}{L_{\Sigma \text{ КА-НСрм(ЗС-АСрм)}} \cdot k_B} \times \frac{G_{\text{пр НСрм(АСрм)}} \cdot \eta_{\text{пр НСрм(АСрм)}} \cdot k_{\text{пол}}}{T_{\Sigma \text{ Ш НСрм(АСрм)}} \cdot \Delta F_{\text{пр НСрм(АСрм)}}}, \quad (7)$$

где $G_{\text{КА-ЗС}}$ – коэффициент усиления по боковым и задним лепесткам диаграммы направленности передающей антенны КА или ЗС соответственно в направлении средства РМ (раз); $G_{\text{пр НСрм(АСрм)}}$ – коэффициент усиления приемной антенны наземной станции (НСрм) или авиационного средства РМ

(АС_{рм}) соответственно (раз); $\eta_{\text{пр НСрм(АСрм)}}$ – коэффициент передачи по мощности волноводного (фидерного) тракта приемной системы (раз); $k_{\text{пол}}$ – коэффициент, учитывающий различие поляризаций передающей и приемной антенн (раз); $L_{\Sigma \text{КА-НСрм(ЗС-АСрм)}}$ – суммарные потери на трассе распространения «КА-НСрм» или «ЗС-АСрм» (раз); $T_{\Sigma \text{ш НСрм(АСрм)}}$ – суммарная шумовая температура приемной системы (К°); $\Delta F_{\text{пр НСрм(АСрм)}}$ – полоса пропускания приемной системы (Гц).

Анализ выражений (1–7) показывает, что повышение скрытности линий СпС, при условии обеспечения требуемого уровня эффективности функционирования системы связи, возможно за счет увеличения:

- коэффициента усиления передающей антенны при одновременном уменьшении уровня ее излучений по боковым и задним лепесткам;
- коэффициента усиления приемной антенны;
- ширины спектра связного сигнала (полосы пропускания приемной системы).

Для реализации мер пространственной селекции на практике, как на приемной, так и на передающей стороне, применяются антенные системы с узкой диаграммой направленности (ДН), которые имеют большой коэффициент усиления и низкий уровень излучения в направлении боковых и задних лепестков.

Выигрыш в скрытности линии СпС от принятия в этих системах узконаправленных антенн можно оценить с помощью энергетического показателя $h_{\text{пи}} = \frac{P_{\text{с мпи}}}{P_{\text{с омпи}}}$ при выполнении следующих условий:

$$\left(\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{вх зс(КА)}} \geq \left(\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{вх зс(КА) тр}}, \left(\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{вх СРМ}} \leq \left(\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{вх СРМ тр}}.$$

Параметром, определяющим уровень боковых и задних лепестков ДН антенной системы, является направление (угол) прихода (излучения) сигнала (Θ). Зависимость нормированной ДН антенной системы от угла относительно направления максимума для фиксированных значений частоты ($f = 36,75$ ГГц) и диаметра антенны ($D_A = 0,435$ м), соответствующих коэффициенту усиления антенны равному 42,27 дБ, приведены на рисунке 2.

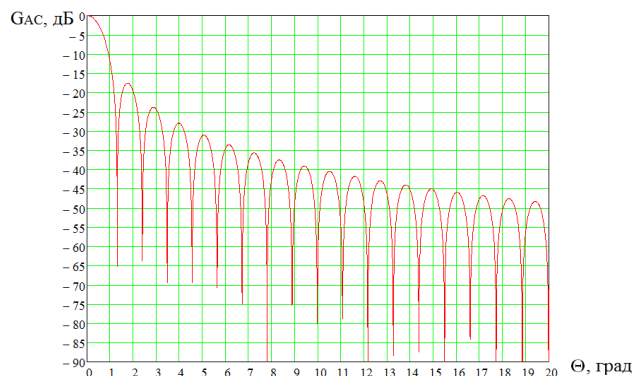


Рис. 2. Зависимость нормированной ДН антенной системы от угла относительно направления максимума

Кроме того, на практике, до начала ведения мониторинга точное местоположение источника связного сигнала для средств, осуществляющих РМ, неизвестно. Для устранения этой неопределенности в средствах РМ либо применяются антенные системы с относительно широкой ДН, либо применяются узконаправленные антенные системы, но дополнительно осуществляется поиск сигналов по пространству. В первом случае снижается мощность сигнала РМ, а во втором – увеличивается время ведения РМ за счет поиска сигналов по пространству. В результате в обоих случаях снижается эффективность решения задачи РМ, что в конечном итоге также позволяет разрешить имеющееся противоречие.

3. Модель функционирования системы спутниковой связи с применением методов сигнальной обработки для обеспечения скрытности ее функционирования от средств радиомониторинга

В большинстве практических случаев, если к системе СпС не предъявляются особые требования, то для организации связи в основном применяются простые сигналы, у которых база равна единице. Среди всего множества простых сигналов в системах СпС наиболее широко применяются сигналы с двукратной фазовой манипуляцией (BPSK, от англ. Binary Phase-Shift Keying) и с четырехкратной фазовой манипуляцией (QPSK, от англ. Quadrature Phase-Shift Keying), которые обладают хорошей помехоустойчивостью (эффективностью, оцениваемой вероятностью ошибочного приема на бит информации). На рисунке 3 представлены зависимости вероятности ошибочного приема от отношения мощности сигнала к мощности шумов на входе демодуляторов сигналов BPSK и QPSK, а также требуемое для большинства систем связи значение вероятности ошибки при передаче данных [10, 11, 14].

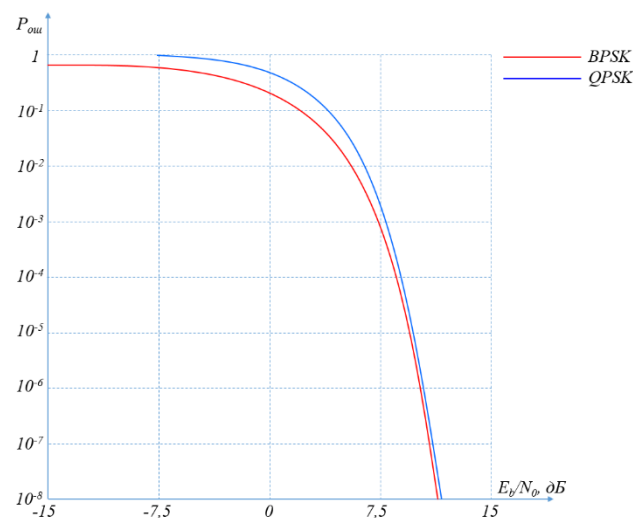


Рис. 3. Зависимости вероятности ошибочного приема от отношения мощности сигнала к мощности шумов на входе демодуляторов сигналов BPSK и QPSK

Анализ представленных зависимостей (см. рисунок 3) показывает, что для обеспечения требуемой вероятности ошибочного приема 10^{-6} пороговое отношение мощности сигнала к мощности шумов на входе демодуляторов сигналов BPSK и QPSK должно составлять порядка 11 дБ. Для обеспечения такого отношения необходимо иметь большую мощность излучения связного сигнала, что ведет к снижению скрытности радиосвязи.

Применение только мер пространственной избирательности для обеспечения скрытности функционирования системы СпС от средств РМ обычно недостаточно, поэтому на практике дополнительно применяются методы помехоустойчивого кодирования и последующего декодирования связных сигналов. Однако эти методы имеют ряд ограничений и обеспечивают незначительное снижение порогового отношения мощности сигнала к мощности шумов на входе демодуляторов (до 5–7 дБ).

Другим способом повышения эффективности обеспечения скрытности является применение методов сигнальной обработки. Эти методы основаны на применении в системах связи сложных сигналов в сочетании с их оптимальной обработкой при приеме, что позволяет увеличить отношение мощности сигнала к мощности шумов на входе демодулятора сигналов приемного тракта ЗС или КА-ретранслятора. В результате этого расширяется спектр излучаемого связного сигнала и одновременно появляется возможность снижения уровня излучаемой мощности связного сигнала без ухудшения качества принимаемого сигнала в соответствующей линии радиосвязи, но при этом уменьшается отношение сигнал/шум в приемной системе средства РМ.

С другой стороны, в средствах РМ для увеличения отношения мощности сигнала к мощности шумов на входе обнаружителя также могут применяться квазиоптимальные методы предварительной обработки сигналов (некогерентное накопление сигналов или авто-/взаимокорреляционная обработка сигналов). Применение методов оптимальной обработки сигналов по сравнению с квазиоптимальными при ограниченной длительности излучения сигнала источником позволяет получить значительно больший выигрыш в отношении мощности сигнала к мощности шумов. В средствах РМ применение методов оптимальной обработки сигналов ограничено отсутствием информации о несущей частоте, параметрах и структуре принимаемых сигналов, в то время как средства связи располагают такой информацией и имеется возможность синхронизации сигналов на передающем и приемном концах линии радиосвязи. Тем самым, обеспечивается скрытность функционирования системы СпС от средств РМ.

На практике для реализации в полной мере требований по скрытности функционирования системы СпС, как правило, необходимо одновременно

применять как меры пространственной избирательности, так и методы оптимальной обработки сигналов.

Для повышения скрытности передачи информации в радиолиниях в качестве мер сигнальной обработки применяются сложные широкополосные сигналы (ШПС), расширяющие спектр информационного сигнала. В качестве ШПС, обеспечивающих скрытность передачи информации, могут применяться следующие их типы:

- фазоманипулированные (ФМн) сигналы, предварительно модулированных расширяющей спектр кодовой последовательностью (ФМн-ШПС);
- сигналы с программной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ);
- комбинированные сигналы ФМн-ШПС с ППРЧ.

С позиции обеспечения скрытности передачи информации, наиболее предпочтительным является применение сигналов типа ФМн-ШПС.

Шумоподобными сигналами называются такие сигналы, у которых база сигналов (B) много больше единицы. База сигнала характеризует расширение спектра ШПС относительно спектра информационного сигнала (сообщения) и равна:

$$B = \Delta F_c \cdot T_{\text{ин}} = \frac{\Delta F_c}{V_{\text{и}}} = \frac{T_{\text{ин}}}{\tau_{\text{э}}} \gg 1, \quad (9)$$

где ΔF_c – ширина спектра ШПС; $\tau_{\text{э}}$ – длительность элементарной посылки ШПС; $T_{\text{пи}}$ – длительность посылки информационного сигнала; $V_{\text{и}}$ – скорость передачи информации.

При приеме ФМн-ШПС наибольший выигрыш в отношении сигнал/шум на выходе ($q_{\text{вых}}$) по отношению ко входу ($\rho_{\text{вх}}$) обеспечивают устройства, реализующие методы оптимального приема (оптимальные приемники сигналов) [3, 4]. В качестве оптимальных приемников применяются метод согласованной фильтрации и метод оптимального корреляционного приема. Структуры устройств, реализующих методы оптимального приема ФМн-ШПС [2], представлены на рисунке 4.

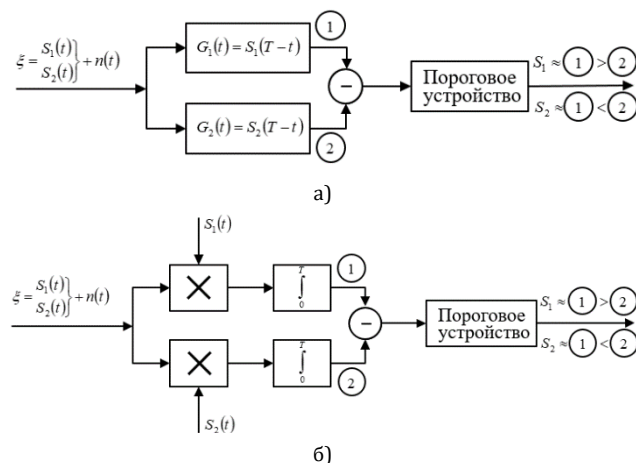


Рис. 4. Структуры устройств, реализующих оптимальные методы согласованной фильтрации (а) и оптимального корреляционного приема сигналов (б)

Указанные методы оптимального приема различаются технической реализацией и обеспечивают одинаковый выигрыш в отношении мощности сигнал/шум на выходе ($q_{\text{вых}}$) по отношению к мощности сигнал/шум на входе ($\rho_{\text{вх}}$), который равен базе ШПС:

$$B = \frac{\rho_{\text{вх}}}{q_{\text{вых}}}. \quad (10)$$

Одним из основных показателей эффективности приема информации при передаче дискретных сигналов является вероятность ошибочного приема на бит передаваемой информации ($P_{\text{ош}}$), которая при оптимальном приеме ФМн-ШПС определяется соотношением [3, 6]:

$$P_{\text{ош}} = 1 - \Phi \left(\sqrt{2 \cdot \rho \cdot \frac{T_{\text{ип}}}{\tau_3}} \right), \quad (11)$$

где $\Phi(x)$ – интеграл вероятности, который рассчитывается по выражению:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \times \int_{-\infty}^x \exp \left(\frac{-z^2}{2} \right) dz.$$

На основе данного соотношения получены зависимости вероятности ошибочного приема ФМн-ШПС от отношения мощности сигнала к мощности шума на входе приемной системы для фиксированных значений базы сигнала, которые приведены на рисунке 5.

На рисунке 5 представлены указанные зависимости для значений базы сигнала B , равной 20, 30 и 40 дБ.

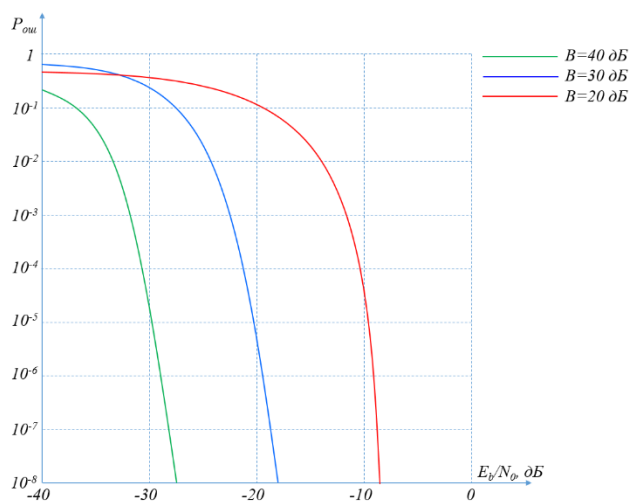


Рис. 5. Зависимости вероятности ошибочного приема от отношения мощности сигнал/шум на входе приемной системы

Список используемых источников

1. 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
2. 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.

Анализ приведенных зависимостей (см. рисунок 5) показывает, что даже при отрицательных отношениях мощности сигнала к мощности шума на входе приемной системы (менее единицы) можно обеспечить эффективный прием связанного сигнала, так как это отношение линейным образом зависит от мощности связанного сигнала, излучаемой источником (КА или ЗС). Тогда, увеличив базу связанного сигнала, можно обеспечить его эффективный прием при пониженной мощности излучения, но при этом уменьшится отношение мощности сигнала к мощности шума на входе приемной системы средств РМ и его эффективное обнаружение становится невозможным.

В качестве другого типа сложных сигналов для организации связи применяются сигналы с ППРЧ. При этом скрытность связи достигается за счет того, что сигнал на одной частотной позиции излучается ограниченной длительности, а смена частотных позиций происходит по псевдослучайному закону, который известен на передающем и приемном концах линии связи, но неизвестен средствам РМ. При наличии ограничений на длительность излучения сигнала осуществление его РМ становится невозможным.

Заключение

На основе проведенного анализа функционирования системы СпС в условиях противодействия средствам РМ можно сформировать следующие предложения и рекомендации по обеспечению скрытности спутникового канала радиосвязи с БЛА.

Во-первых, максимально использовать пространственную скрытность КА.

Во-вторых, минимизировать ширину ДН и мощность излучения связанного сигнала за счет увеличения добротности приемного тракта средства ЗС СпС. 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 средств РМ и другой информации о средствах РМ).

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

3. Бузов А.Л., Букашкин С.А. Специальная радиосвязь. Развитие и модернизация оборудования и объектов. М.: Радиотехника, 2017. 448 с.
4. Кузовников А.В. и др. Современные технологии радиомониторинга в спутниковых системах связи и ретрансляции. М.: Радиотехника, 2015. 214 с.
5. Журавлев В.И., Руднев А.Н. Цифровая фазовая модуляция. М.: Радиотехника, 2012. 208 с.
6. Немировский М.С., Локшин Б.А., Аронов Д.А. Основы построения систем спутниковой связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2017. 432 с.
7. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П. Компьютерное моделирование передачи полезной информации в спутниковых радиопереносах при многолучевой связи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 3-1. С. 127–131.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Иванкин Е.Ф. Информационные системы с апостериорной обработкой результатов наблюдений. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 168 с.
12. Лепин В.Н. Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием. М.: Радиотехника, 2017. 416 с.
13. Рудой В.М. Системы передачи информации: учебное пособие. М.: Радиотехника, 2007. 280 с.
14. Ярлыкова М.С. Марковская теория оценивания в радиотехнике. М.: Радиотехника, 2004. 505 с.
15. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Моделирование информационных систем. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
16. Верба В.С., Татарский Б.Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х книгах. М.: Радиотехника, 2016. 1352 с.
17. Дворников С.В., Духовнический О.Г. Оценка помехозащищенности профессионального радионавигационного оборудования системы Глонасс // Информация и космос. 2015. № 4. С. 73–77.
18. 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.
19. Чипига А.Ф., Пашинцев В.П. Повышение энергетической скрытности систем спутниковой связи при близком размещении приемника радиоперехвата // Нелинейный мир. 2013. Т. 11. № 9. С. 659–671.

* * *

MATHEMATICAL MODEL OF SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES AND COUNTER-MEANS OF RADIO CONTROL. PART 1

A. Egorov¹, A. Lomakin¹, D. Pantenkov¹

¹JSC Kronstadt,
Moscow, 115432, Russian Federation

Article info

The article was received 18 April 2019

For citation: 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>

Abstract: *Currently, satellite radio communication is the main type of radio communication related to the majority of special purpose mobile objects, including unmanned aerial vehicles (UAV) of heavy and super heavy classes of long flight duration, which are forced to move over long distances up to several thousand kilometers from the take off place (airport). In this point we face the problem of quality of the channel of the satellite radio communication line on its*

entire way between the transmitting and receiving devices, including providing the interference protection, stealth and secrecy of transmission of command telemetry and target information. At the same time, it is necessary to take into account the possibility of using the means of radio control of a satellite radio channel from an eventual enemy, which can lead to the interception of the control channel or access to target information from the payloads of UAV. In this scientific and technical article, which consists of two parts, considered the issues of improving the efficiency of transmitted information via satellite communication channels between the UAV and the ground control and information processing point, and the issue of countering the means of radio control of the eventual enemy, formulated proposals and recommendations.

Keywords: complexes with unmanned aerial vehicles, satellite radio communication system, spacecraft, improving the efficiency of the unmanned aerial vehicle, radio monitoring tools, mathematical modeling, noise immunity, stealth satellite radio line, signal and energy parameters.

References

1. Tiulin A.E., Betanov V.V., Larin V.K. *Informatsionnoe obespechenie upravleniia 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>
2. Testodov N.A., Kosenko V.E., Vygon'skii Iu.G., Kuzovnikov A.V., Mukhin V.A., Chebotarev V.E., et al. *Kosmicheskie sistemy retransliatsii* [Space Relay Systems]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2017. 448 p. (in Russ.)
3. Buzov A.L., Bukashkin S.A. *Spetsialnaia radiosv'яз. Razvitie i modernizatsiia oborudovaniia i ob'ektov* [Special Radio Communication. Development and Modernization of Equipment and Facilities]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2017. 448 p. (in Russ.)
4. 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.)
5. Zhuravlev V.I., Rudnev A.N. *Tsifrovaia fazovaia moduliatsiia* [Digital Phase Modulation]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2012. 208 p. (in Russ.)
6. 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.)
7. 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.)
8. 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.)
9. 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.)
10. 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.)
11. Ivankin E.F. *Informatsionnye sistemy s aposteriorni obrabotkoi rezultatov nabludenii* [Information Systems with a Posteriori Processing of Observation Results]. Moscow: Goriachaia Liniia – Telekom; 2008. 168 p. (in Russ.)
12. Lepin V.N. *Pomekhozashchita radioelektronnykh sistem upravleniia letatel'nykh apparatami i oruzhiem* [Noise Protection of Radio Electronic Control Systems of Aircraft and Weapons]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2017. 416 p. (in Russ.)
13. Rudoy V.M. *Sistemy peredachi informatsii uchebnoe posobie* [Information Transmission Systems: Textbook]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2007. 280 p. (in Russ.)
14. Yarlukov M.S. *Markovskaia teoriia otsenivaniia v radiotekhnike* [Markov's Theory of Estimation in Radio Engineering]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2004. 505 p. (in Russ.)
15. Shelukhin O.I., Teniakhev A.M., Osin A.V. *Modelirovanie informatsionnykh sistem* [Modeling of Information Systems]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2005. 368 p. (in Russ.)
16. Verba V.S., Tatarsky B.G. *Komplekсы s bespilotnymi letatel'nykh apparatami* [Complexes with Unmanned Aerial Vehicles in 2 Books]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2016. 1352 p. (in Russ.)
17. Dvornikov S.V., Dukhovnitsky O.G. Otsenka pomekhozashchishchennosti professional'nogo radionavigatsionnogo oborudovaniia sistemy Glonass [The Estimation of Noise Immunity of Professional Navigation Equipment GLONASS]. *Informatsiia i kosmos*. 2015;4:73–77. (in Russ.)
18. Agievich S.N., Lutsenko S.A. Estimation of noise immunity of satellite radio communication systems with Phase-Manipulated Broadband Signals. *Military Engineering. Issue 16. Counter-terrorism technical devices*. 2018;123–124:132–137. (in Russ.)
19. Chipiga A.F., Pashintsev V.P. Increase of power reserve systems of satellite communication at close placement of the receiver of radio interception. *Nonlinear World*. 2013;11(9):659–671. (in Russ.)