

МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ ЛОЖНЫХ ПРЕДНАМЕРЕННО ФОРМИРУЕМЫХ СИГНАЛОВ АЗН-В

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-11-4-13

Manuscript received 22 June 2020;
Accepted 24 September 2020

Калинцев Андрей Сергеевич,
Архангельский центр ОВД филиала "Аэронавигация
Северо-Запада" ФГУП "Государственная корпорация
по ОрВД в РФ", Мезень, Россия, kas4job@gmail.com

Рубцов Евгений Андреевич,
ФГБОУ ВО СПбГУ ГА, Санкт-Петербург, Россия,
rubtsov.spb.guga@rambler.ru

Ключевые слова: безопасность полетов,
АЗН-В, линия передачи данных, 1090ES,
расстояние Махаланобиса, диаграмма
направленности антенны

Международная организация гражданской авиации рекомендует применять перспективные системы наблюдения: многопозиционные системы наблюдения и автоматическое зависимое наблюдение вещательного режима. Наземные станции автоматического зависимого наблюдения обладают сравнительно небольшой стоимостью и в перспективе могут частично заменить вторичные радиолокаторы. В настоящее время развитие автоматического зависимого наблюдения замедлилось, так как системе присущи уязвимости: полная открытость линии передачи данных 1090ES, отсутствие шифрования и защиты от ложных преднамеренно формируемых сигналов. На рынке имеется большое количество оборудования для приема и обработки сигналов бортового ответчика; для специалистов не составляет труда собрать передающую аппаратуру, генерирующую подобные сигналы. Это представляет серьезную угрозу информационной безопасности и безопасности полетов. Предлагается методика, позволяющая путем комплексного анализа траектории движения воздушного судна и характера изменения уровня принимаемых сигналов выявлять ложные сигналы, формируемые преднамеренно. Предлагаемая методика основана на выявлении аномальных характеристик ложных сигналов. Для поиска и идентификации аномальных характеристик оценивается расстояние Махаланобиса. Для повышения различимости данных и выявления преднамеренного вмешательства необходима модернизация антенной системы наземной станции путем внедрения дополнительной антенны с отличающейся от основной диаграммой направленности. Ложный сигнал, сформированный наземным источником выявляется по постоянному значению отношения коэффициентов направленности антенн. Разработанная методика была реализована в программном пакете MATLAB и применена для оценки реальных данных, полученных от наземной станции автоматического зависимого наблюдения, расположенной в Архангельском центре обслуживания воздушного движения. В качестве эталонных использовались значения уровня мощности принятых сообщений автоматического зависимого наблюдения, полученные от воздушных судов L-410, выполняющих полеты в зоне местных воздушных линий.

Информация об авторах:

Калинцев Андрей Сергеевич, техник радионавигации, радиолокации и связи службы ЭРТОС Архангельского центра ОВД филиала "Аэронавигация Северо-Запада" ФГУП "Государственная корпорация по ОрВД в РФ", Мезень, Россия.

Рубцов Евгений Андреевич, к.т.н., доцент кафедры "Радиоэлектронные системы", ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации", Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Калинцев А.С., Рубцов Е.А. Методика выявления ложных преднамеренно формируемых сигналов АЗН-В // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №11. С. 4-13.

For citation:

Kalintsev A.S., Rubtsov E.A. (2020) Method of detecting false intentionally generated ADS-B signals. T-Comm, vol. 14, no.11, pp. 4-13. (in Russian)

Введение

Глобальный аэронавигационный план (ГАНП) [1, 2] и план по обеспечению безопасности полетов [3] являются документами Международной организации гражданской авиации (ИКАО), определяющими вектор развития гражданской авиации. В перечисленных документах рекомендовано применение перспективных систем наблюдения, в том числе системы АЗН-В. ГАНП [1, 2] на техническом уровне предполагает внедрение и расширение инфраструктуры станций АЗН-В. Преимуществом АЗН-В является низкая цена, составляющая менее 20000 долл. за одноканальную станцию [4]. В Российской Федерации в 2018 году принята Концепция [5] которая предполагает использование в качестве единого стандарта АЗН-В линию передачи данных (ЛПД) 1090 ES.

В руководстве по авиационному наблюдению [6] отмечается, что линия передачи данных 1090ES обладает уязвимостями, поэтому принятые данные нужно подтверждать либо с помощью вторичного радиолокатора, либо с помощью многопозиционной системы наблюдения (МПСН). Стоимость современных МПСН составляет около 2 млн. долл. [7]. Таким образом, рекомендация ИКАО перечеркивает перспективу создания недорогой и эффективной системы наблюдения, основанной на наземных станциях АЗН-В.

Рассмотрим причины уязвимости подробней. В работе [8] в качестве основных причин незащищенности системы АЗН-В указывается, что система разрабатывалась как открытая для любого участника, чтобы все участники имели возможность видеть друг друга. На момент разработки системы отсутствовали серьезные кибертеррористические угрозы.

В настоящее время у граждан имеется свободный доступ к информации о номере рейса и местоположении ВС через общедоступные сайты сети интернет (например, через сайт www.flightradar24.com).

Поскольку ЛПД 1090ES не предполагает применения кодирования (для защиты информации), при наличии свободно распространяющегося оборудования [9] возможно получение и полная расшифровка сигналов ВС, находящихся в зоне прямой радиовидимости наземной антенны приемника. Таким образом, возможно сгенерировать сигнал, практически не отличающийся по составу информации (по информации в подполях и соответствующий стандарту RTCA DO260 [10]) от реального и, путем задания координат близких к координатам конкретного ВС, создать серьезную угрозу информационной безопасности ЛПД и безопасности полетов, ухудшив работу автоматизированных систем управления воздушным движением (АС УВД) по идентификации, определению координат и сопровождению объектов. Следовательно, сегодня, реальную и особую опасность представляют преднамеренные помехи, имитирующие сигнал бортового ответчика.

Приведем некоторые варианты решения проблемы низкой защищенности системы АЗН-В:

1. Возможно применение кодирования (закрытия информации). Данный шаг потребует принятия соответствующих стандартов и обеспечения согласованной работы бортовой и наземной аппаратуры АЗН-В. В ближайшей перспективе реализация такого решения встретит трудности, в основном, из-за необходимости большого количества согласований.

2. Поскольку самолет движется, а передатчик мешающего сигнала – нет, у сигнала бортового ответчика будет наблюдаться доплеровский сдвиг. Согласно [11] спектр сигнала, сформированного бортовым ответчиком ускоренно движущегося ВС имеет смещение центральной частоты, трансформацию масштаба, а также приобретает внутримпульсную линейную частотную модуляцию. Это явление может быть использовано при выявлении ложных сигналов, сформированных неподвижным источником, однако при этом необходимо внести существенные изменения в наземную аппаратуру приема и обработки сигналов, организовать разнесенный в пространстве прием, а также гарантировать достаточно высокую стабильность рабочей частоты бортового передатчика, что подразумевает и модернизацию бортовых систем АЗН-В. Реализация этого решения потребует достаточно больших затрат, особенно при модернизации бортового оборудования.

3. Перемещение ВС в пространстве возможно установить не только по доплеровскому сдвигу частоты, но и по изменяющемуся с течением времени уровню сигнала, учитывая при этом направленные свойства антенной системы. Реализация потребует минимальных вложений в связи с отсутствием необходимости согласований и модернизации передающего оборудования ВС.

С учетом перечисленных способов повышения защищенности и их недостатков, в качестве основного подхода в работе рассматривается третий вариант.

Методика выявления ложных преднамеренно сформированных сигналов АЗН

Разработанная методика является комплексной и включает в себя несколько шагов. На первом шаге необходимо проанализировать траекторию полета ВС. При появлении аномальных значений текущих координат, модуля и направления вектора скорости ВС, анализируемый сигнал может быть классифицирован как ложный.

Рассмотрим регулярные полеты местных воздушных линий (МВЛ). Отличительной характеристикой полетов по МВЛ являются небольшие высоты ВС и относительно малые расстояния между населенными пунктами. Траектория движения ВС, как правило, является прямолинейной.

Для области выполнения полетов примем некоторые обозначения:

– Пусть $S \{x_i, y_i\}$ – разрешенная область пространства в пределах которого выполняются регулярные полеты МВЛ – координаты трассы с учетом допустимых погрешностей АЗН-В.

– $Tr_{ij} = ((x_i, y_i, h_i), \dots, (x_j, y_j, h_j))$, где $i = 1 \dots N$ – накопленные при выполнении ВС N полетов - история траекторий полетов в зоне МВЛ по направлению из пункта A в пункт B . Примем высоту полета ВС при движении из пункта A в пункт B неизменной.

– $D = ((x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n))$, где $n = 1 \dots N$ – накопленные при выполнении полетов в заданном направлении значения широты и долготы/(координаты) ВС, причем для D выполняется условие $D \subset S$.

– $Tr_{vc} = ((x_k, y_k), \dots, (x_n, y_n))$, где $k = 1 \dots N$ – координаты траектории наблюдаемого ВС.

Верификация ВС выполняется поэтапно по нескольким критериям и состоит из первичной проверки соответствия и непосредственно самих этапов верификации.

Приведем шаги первичной проверки соответствия принадлежности ВС к области анализируемого пространства. В первую очередь необходимо определить соответствие маршрута ВС и плановой информации, т.е. выполняется проверка допуска к выполнению полетов в зоне УВД. Далее проводится проверка соответствия между маршрутом по плану полета ВС и областью пространства, в котором наблюдаемое судно находится.

В качестве дополнительных мер при определении соответствия принадлежности ВС к области воздушного пространства предлагается учитывать географические особенности местоположения наземной станции (НС) АЗН-В. В соответствии с рекомендациями [12] при проектировании места установки и вводе в эксплуатацию средств радиотехнического обеспечения полетов и связи необходимо учитывать углы закрытия. В случае, если для системы АЗН-В имеются углы закрытия, получение координат наблюдаемого ВС принадлежащих зоне, расположенной в зоне затененной препятствием будет свидетельствовать либо о наличии ошибок определения координат, либо о неправильной работе или преднамеренном вмешательстве. Таким образом, использование знаний об углах закрытия, а значит и о «мертвых зонах», в АС УВД или программном обеспечении наземной станции АЗН-В и ее использование в качестве дополнительной информации, позволит, в некоторых случаях, обнаружить неисправность в работе или факт преднамеренного вмешательства в ЛПД 1090ES.

После выполненной первичной проверки, верификация данных от наблюдаемого ВС осуществляется в несколько этапов.

На первом этапе необходимо выполнить проверку принадлежности координат наблюдаемого ВС к пространству S т.е. убедиться в выполнении условия $T_{rbc} \subset S$.

Учитывая координаты траектории наблюдаемого ВС, по направлению и скорости движения, а также в зависимости от типа ВС строится траектория движения - TR :

$$TR = f(T_{rbc}, v, \alpha, M), \quad (1)$$

где v – модуль вектора скорости наблюдаемого ВС по данным наземной станции АЗН-В; α - направление вектора скорости ВС; M – тип ВС; T_{rbc} – координаты траектории наблюдаемого ВС.

Построенная траектория TR представляет собой прямую линию, относительно которой, за интервал времени t , по полученным данным АЗН-В (координатам наблюдаемого ВС), вычисляется среднее значение бокового отклонения:

$$\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i, \quad (2)$$

где k – количество элементов выборки; x_i – i -й элемент выборки.

На втором этапе необходимо обеспечить контроль за поступающими данными – координатами ВС. В дополнение к уже существующим в системе АЗН-В методам контроля целостности, включающим подполя NIC , $NACp$, NUC , SIL [10, 13], необходимо выполнить контроль получаемых координат на отсутствие выбросов (значительных ошибок определения местоположения) и соответствие полученных координат ВС построенной траектории TR .

В соответствии с [6] допускается принять, что модель распределения погрешностей координат системы АЗН-В описывается нормальным законом распределения.

Среднеквадратическое отклонение (СКО) бокового отклонения за время t относительно построенной траектории движения TR определяется как:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3)$$

где x_i – i -ый элемент выборки; k – количество элементов выборки; \bar{x} – среднее значение бокового отклонения относительно траектории движения.

Траектория TR на прямолинейном участке движения ВС должна совпадать, учитывая заранее установленные допуски к погрешности местоположения (коэффициент допустимой погрешности K_{don}), с математическим ожиданием измеряемой величины – траекторией ВС.

Значения СКО бокового отклонения от TR фиксируются, при этом вектор записанных значений записывается как $\sigma = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_i]$, где x_i – i -й элемент выборки.

Совместно с фиксацией значений СКО от траектории TR выполняется оценка точности прогнозирования траектории. Максимальная погрешность СКО бокового отклонения относительно TR должна находиться в пределах $K_{don} \leq \pm 3\sigma$, т.е. необходима проверка выполнения условия:

$$P[-3\sigma \leq \Delta x \leq 3\sigma] = 0,997 \quad (4)$$

Иными словами, при соблюдении условия (4), можно сделать вывод, что с вероятностью 99,7% траектория движения ВС является прямолинейной и совпадает с виртуальной траекторией TR . Таким образом, значения СКО бокового отклонения являются признаком изменения траектории движения, а условие (4) – признаком прямолинейности движения.

Третий этап включает вычисление и анализ расстояния Махаланобиса, а также проверку на стационарность источника информации.

В контексте решаемой задачи примем, что диаграмма направленности (ДН) антенно-фидерного устройства (АФУ) каждого пользователя ЛПД 1090 ES является индивидуальной характеристикой приемной системы, т.е. зависит от свойств подстилающей поверхности, высоты подъема фазового центра антенны, а также углов закрытия. Данные, на которые оказывает влияние ДН - амплитуда принятого сигнала, могут считаться индивидуальными для каждого пользователя. Следовательно, такие данные могут быть использованы для верификации пользователей воздушного пространства. Известно [14], что в точке приема наблюдается чередование максимумов и минимумов ДН. Для ВС, в зависимости от таких характеристик, как скорость движения и высота полета, скорость чередования максимальных и минимальных значений является индивидуальной, следовательно, и амплитуда принятого наземной станцией АЗН-В сигнала имеет зависимость от характеристик движения и скорости полета. В зоне МВЛ, для рейсовых полетов на прямолинейных участках, характер изменения амплитуды при-

нятого сигнала может быть использован для выявления преднамеренного вмешательства. В данном случае данные передаваемые злоумышленником могут быть рассмотрены как аномальное поведение.

В качестве метрики расстояния между объектами зачастую используют евклидово расстояние [15]. Расстояние Махаланобиса (MD) получило широкое применение при решении задач классификации изображений и сигналов, а также при поиске их аномальных значений [16-19]. Данное расстояние отличается от евклидова тем, что учитывает корреляции между переменными и является инвариантным к масштабу.

Задача верификации наблюдаемого ВС может быть рассмотрена как задача выявления выбросов, поиска аномального поведения, не соответствующего рассматриваемой модели системы ВС – наземная станция АЗН-В. Иными словами, необходимо установить соответствие поступающих данных лишь к одному классу, характеризующему нормальное состояние системы ВС – наземная станция АЗН-В. Такая формулировка задачи позволяет использовать заранее известные и подтвержденные данные при выполнении классификации значений принятой информации от неизвестного источника.

Пусть X – матрица накопленных данных размерности $m \times n$:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m1} & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

В выражении (5) параметры рассматриваемого объекта содержатся в столбцах матрицы X , а наблюдения – в строках. Таким образом i -й столбец это переменная, а j -я строка является j -м наблюдением на удалении j .

Расстояние Махаланобиса от вектора $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)$ до множества со средним значением $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_p)$ и матрицей ковариаций S определяется как [20]:

$$d_M = \sqrt{(x - \mu)^T S^{-1} (x - \mu)}, \quad (6)$$

где S^{-1} – матрица, обратная ковариационной матрице; $(x - \mu)^T$ – транспонированный вектор $(x - \mu)$.

Пусть $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ – набор данных об объекте, которые были полученные за N предыдущих наблюдений, т.е. данные прошедшие проверку достоверности и характеризующие нормальную работу системы, а $Y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ – данные поступающие от наблюдаемого объекта. Тогда рассчитанное MD для накопленных и наблюдаемых данных в момент времени $t = (t_1, t_2, t_3, \dots, t_n)$, где t_1, \dots, t_n – моменты времени наблюдаемых данных, будет являться «метрикой», на основании которой мы сможем сделать вывод о «достоверности» поступающих данных от наблюдаемого ВС. При увеличении значения расстояния MD достоверность получаемых данных от наблюдаемого объекта снижается.

Примем, что данные – зависимость амплитуды принятого сигнала от удаления. Метрика MD рассчитывается для данных ВС движущегося прямолинейно на установленной высоте. Для этого, для траектории движения, по которой выполняются полеты МВЛ, необходимо определить прямолинейный участок и выполнять расчеты следует для этого участка. При этом необходимо выполнение условия: область пространства в котором находится ВС должна совпадать с регулярными маршрутами МВЛ.

Накопленные за время выполнения полета ВС данные записываются. При выполнении расчетов MD в качестве данных характеризующих нормальное состояние системы необходимо учитывать данные накопленные за полный цикл полета ВС – подтвержденные данные. Пусть, количество используемых для дальнейших вычислений данных равно N . Тогда, вновь поступающие данные $N+1$ фиксируются и выполняется поочередная перезапись наиболее устаревших значений на новые данные.

Для данных об амплитуде сигнала, поступающих от наблюдаемого ВС и накопленных ранее N данных выполняется расчет расстояния Махаланобиса. В результате рассчитанной «метрики» MD и некоторого граничного значения делается вывод о достоверности данных – верификация источника информации.

Необходимо определить граничное значение для расстояния Махаланобиса, тогда, когда рассчитанное значение для получаемых данных превышает граничное значение - сигналам присваивается наименьшая степень доверия, в случае, если рассчитанное значение не превышает граничное расстояние – присваивается высокая степень доверия. При $MD = 0$ присваивается максимальная степень доверия. В качестве граничного значения предлагается использовать расстояние MD , рассчитанное для значений мощности в точке приема при распространении в свободном пространстве. Значения мощности передатчика и коэффициентов усиления ДН, при выполнении расчета граничного значения, задаются заранее.

Выявление ложных сигналов АЗН-В в ближней аэродромной зоне

Опишем процедуру выявления преднамеренного вмешательства в систему ЛПД применительно к ближней аэродромной зоне. При обеспечении УВД ближняя аэродромная зона является наиболее ответственной и опасной с точки зрения обеспечения безопасности полетов. При обеспечении полетов МВЛ примем в качестве ближней аэродромной зоны окружность с радиусом 20 км. Размеры зоны могут быть изменены исходя из специфики выполнения полетов.

С целью повышения информационной защищенности системы АЗН-В и выявления преднамеренного вмешательства предлагается использование дополнительной антенны с формой ДН имеющей значительные отличия от формы ДН действующей антенной системы. Значения коэффициентов направленного действия (КНД) антенных систем для одного значения угла места (УМ) не должны совпадать.

Учитывая, что при верификации наблюдаемого ВС допустимы задержки (решение принимается на основании накопленных данных) к дополнительной антенной системе и вычислительному модулю предъявляется только требование

обеспечения максимального коэффициента различимости по отношению к основной антенной системе. Снижение требований к КНД дополнительной антенны обусловлено размерами зоны МВЛ, а также тем, что информация ЛПД 1090ES обрабатывается основной антенной системой.

Принятые на два АФУ значения мощности фиксируются. В случае стационарности злоумышленника – источник информации будет иметь неизменный УМ для каждой из антенн. Значения КНД, соответствующие УМ, также будут постоянны для каждой антенны. Тогда, приближено, принятые на обе антенны сигналы одного информационного сообщения будут отличаться друг от друга на значения КНД. При неподвижности передатчика отношение КНД антенн будет неизменным. Примем это как условие стационарности объекта. Необходимо выполнять проверку условия стационарности объекта в случае если координаты либо уровень мощности наблюдаемого ВС соответствуют ближней аэродромной зоне. Математически условие стационарности источника информации можно записать как:

$$\frac{P_{1Ga_1}}{P_{1Ga_2}} = \frac{P_{2Ga_1}}{P_{2Ga_2}} = \dots = \frac{P_{nGa_1}}{P_{nGa_2}} = const \quad (7)$$

где P_{1Ga_1} , P_{2Ga_2} – значения мощности принятого сигнала 1 и 2 антенной соответственно, на момент начала отсчетов ($n = 1$); P_{nGa_1} и P_{nGa_2} – значения мощности принятого сигнала 1 и 2 антенной соответственно, для n -го измерения, где $n = 1, 2, 3, \dots, N$ – количество принятых отсчетов.

Ложный сигнал, в случае стационарности местоположения источника, обладает постоянными параметрами: азимутом и углом места. Следовательно, среднее арифметическое отношение накопленных значений уровней мощности принятых антенными системами сигналов за время t будет фиксированным. Проверка выполнения условия (7) позволяет идентифицировать злоумышленника и выявить преднамеренное вмешательство, даже в случае, если генерируются сигналы переменной мощности.

На практике, сравнение отношения мощностей принятых сигналов в связи с наличием погрешностей измерений является затруднительным. Предлагается ввести коэффициент стационарности источника информации – K , который равен отношению принятых значений мощности на обе антенны и оценивать его изменения. Среднее значение коэффициента за время t находим как:

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i, \quad (8)$$

Далее рассчитываем СКО коэффициента стационарности за время t :

$$\sigma(K) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2}{n}}, \quad (9)$$

Временной отрезок необходимо выбирать исходя из скорости движения наблюдаемого ВС. В случае, если величина СКО не превышает пороговое значение – делается вывод о стационарности источника информации.

Выявление ложных сигналов АЗН-В в дальней аэродромной зоне и на прямолинейном участке воздушной трассы

Накопленные значения СКО амплитуды принятых сигналов являются информационными характеристиками, которые после подтверждения действительности данных поступающих от ВС, могут быть использованы для выявления аномалий в ЛПД 1090ES при обеспечении полетов МВЛ. Таким образом, аномальными ситуациями могут быть неизменная или меняющаяся линейно амплитуда ложного сигнала на протяжении длительного времени. По накопленной статистике такая ситуация может быть выявлена. Для этого необходимо разбить дистанцию на участки небольшой длины $D = (d_1, d_2, d_3, \dots, d_n)$, и для каждого участка длиной d_n рассчитать СКО амплитуды принятого сигнала ВС [21]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (10)$$

где x_i – i -й элемент выборки; N – количество элементов выборки; \bar{x} – среднее арифметическое рассчитанное по формуле (2).

СКО амплитуды сигналов могут быть представлены в виде вектора значений $std = [std_1, std_2, std_3, \dots, std_n]$ где $n = 1 \dots N$ – количество участков длиной d_n . Вектор значений будет использован в дальнейшем для расчета расстояния Махаланобиса.

Также, необходимо фиксировать значения отношения амплитуды принятых на основную и дополнительную антенны сигналов. Принятые значения записываются, и, после подтверждения, используются для выполнения расчета расстояния Махаланобиса совместно с ранее накопленными данными применительно к наблюдаемому ВС.

Рассмотрим приемную систему. Так как на обе антенны приходит один сигнал, отношение принятых сигналов позволит найти отношение КНД антенн для одного и того же УМ. В случае реальности наблюдаемого объекта УМ является функцией высоты и удаления ВС. Таким образом КНД являются функциями высоты полета ВС и удаления, как и их отношение. Отношение КНД и их зависимость от удаления и высоты полетов может быть использована для верификации пользователей воздушного пространства и обнаружения преднамеренного вмешательства.

Примем $K = [k_1, k_2, k_3, \dots, k_n]$, где $n = 1 \dots N$ – количество переданных сигналов, вектор значений отношения КНД антенной системы для i -го УМ переданных сигналов ВС.

По принятым и подтвержденным сигналам формируются два вектора накопленных данных: значения СКО уровней принятого сигнала и отношение КНД антенной системы для углов места переданных сигналов:

$$sdp = [sdp_1, sdp_2, sdp_3, \dots, sdp_n] \text{ и } K = [k_1, k_2, k_3, \dots, k_n],$$

где $n = 1 \dots N$ – соответствует наблюдению переменных в момент времени t .

Расстояние Махаланобиса рассчитывается для N накопленных подтвержденных значений отношения принятых сигналов и наблюдаемого ВС.

На основании рассчитанного расстояния и, в случае, если источник ложного сигнала не меняет свое местоположение, его постоянства, делается вывод о наличии ложного преднамеренно сформированного сигнала, имитирующего полет ВС.

Анализ данных наземной станции АЗН-В Архангельского центра ОВД

Применим разработанную методику для оценки данных одной из наземных станций АЗН-В, размещенной в Архангельском центре ОВД. Выполним полунатурное моделирование. При моделировании использовались реальные данные, полученные станцией АЗН-В в период времени с 25.10.2019 по 12.12.2019. Исследовались отчеты ВС L-410, выполняющего рейсовые полеты МВЛ. Данные были взяты для одного направления. Из массива данных, полученных наземной станцией АЗН-В с периодичностью 1 с были сняты и получены отчеты для ВС выполняющего полет по заданному маршруту. Данные были сняты для ВС выполнявших движение по одному маршруту и в одном направлении. Ближней аэродромной зоной принята окружность радиусом 20 км. Участок с удалением 30...100 км можно считать прямолинейным, так как ВС выполняют предпосадочный маневр на участке 0...30 км. Значения мощности принятого сигнала выполненными полетами МВЛ в одном направлении были приняты в качестве подтвержденных накопленных данных.

На рисунке 1 представлены графики зависимости мощности принятого сигнала от удаления для ВС выполняющих рейсовые полеты в одном направлении. На рисунке 1 также представлена зависимость мощности сигнала в точке приема от удаления, рассчитанная с учетом потерь при распространении в свободном пространстве:

$$P_{free_i} = P_t - L_0 + G_t + G_r, \quad (11)$$

где L_0 – потери при распространении в свободном пространстве; P_t – мощность передатчика; G_t, G_r – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн.

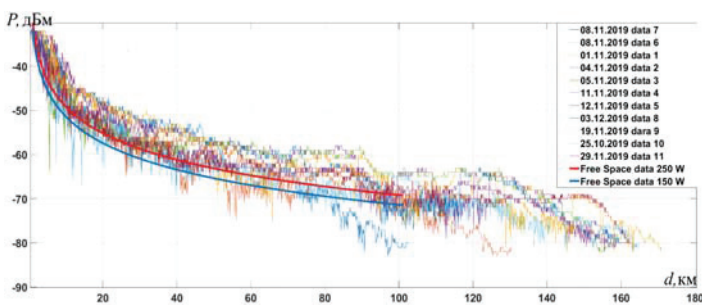


Рис. 1. Зависимость мощности принятой станцией АЗН-В сигнала от удаления ВС

В соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи и телеграфии [22] потери при распространении в свободном пространстве определяются как:

$$L_0 = 32.4 + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(d) \quad (12)$$

где f – частота сигнала (1090 МГц); d – удаление от точки приема (км).

На рисунке 1 красной и синей сплошными линиями обозначены значения мощности для свободного пространства рассчитанные по выражению (12). Красная сплошная рассчитана для мощности передатчика 250 Вт, синяя – 150 Вт.

На представленном графике зависимости мощности от удаления видно, что принятые сигналы имеют чередующиеся максимумы и минимумы мощности принятого сигнала, вызванные прежде всего многолучевой ДН антенны, а также многолучевым распространением волн, влиянием параметров атмосферы, подстилающей поверхности и т.д.

Неравномерность реальных значений мощности сигнала значительно усложняет идентификацию преднамеренного вмешательства по уровню принимаемого сигнала. В случае, если злоумышленник будет использовать сигнал с переменной мощностью, его фильтрация на приемной стороне по уровню принятой мощности может привести к удалению полезного сигнала.

В программном обеспечении MATLAB была написана программа, с помощью которой из отчетов реальных данных были извлечены значения мощности принятого сигнала, а также высота и координаты ВС.

Была выполнена линейная интерполяция данных. С помощью программного обеспечения MATLAB выполнено полунатурное моделирование расчета квадрата расстояния Махаланобиса для принятых значений уровня мощности сигнала (полученные из отчетов данные мощности сигналов были преобразованы и выполнен расчет расстояния Махаланобиса). При выполнении полунатурного моделирования расчета MD^2 условимся, что признак прямолинейного движения равен некоторому значению L и соответствует нормальному состоянию системы, поэтому учитывать не будем. В качестве переменных будем использовать только значения мощности принятого сигнала и удаления для $N=10$ выполненных рейсов. В качестве наблюдаемых сигналов использовались значения мощности принятого реального сигнала и значения мощности, рассчитанные для свободного распространения сигнала.

На рисунке 2 представлена зависимость рассчитанных значений метрики $MD1$ – квадрата расстояния Махаланобиса (MD^2) от удаления для функции мощности сигнала при распространении в свободном пространстве ($P_{free} = 200$ Вт, $P_{free} = 150$ Вт) и вектором значений мощности принятого реального сигнала. Метрика $MD1$ рассчитывалась для вектора дальности 1...101 км. На рисунке 2 красной линией показана метрика $MD1$ для свободного пространства, рассчитанная для мощности передатчика $P_{free} = 200$ Вт, черной пунктирной линией для мощности $P_{free} = 150$ Вт, синим цветом для реальных данных, полученных от ВС. По представленным данным можно сделать вывод, что для участка 0-30 км метрика $MD1$ для реальных значений превышает значения метрики для свободного распространения сигнала. Следует отметить, что данный участок не является прямолинейным и полеты на этом участке выполняются по двум траекториям. Приведенные значения мощности сигнала являются завышенными («критическими»).

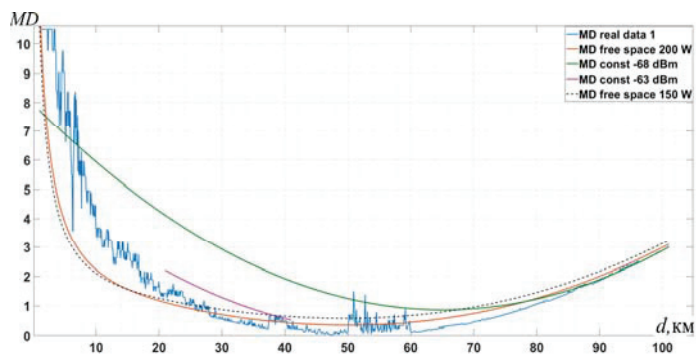


Рис. 2. Расстояние Махаланобиса для 01.11.2019 (набор данных data1) и значений мощности при распространении в свободном пространстве

Рассмотрим более простой в реализации случай (основной сценарий) преднамеренного вмешательства с постоянной мощностью ложного сигнала. Следующим этапом выполнен расчет квадрата MD (MD^2) для сигналов постоянной мощности со значениями -68 дБм и -63 дБм. С целью снижения количества рисунков, результаты моделирования представлены на рис. 2, где зеленым цветом показана метрика $MD1$ рассчитанная для постоянного значения мощности -68 дБм, розовым цветом показана метрика, рассчитанная для сигнала -63 дБм, действующего на участке 21...41 км. По представленным данным можно сделать вывод, что метрика $MD1$ позволяет хорошо идентифицировать значения постоянной мощности.

Рассчитанное расстояние Махаланобиса MD^2 не всегда позволяет хорошо идентифицировать данные, что видно на рис. 3 для набора данных data8 (распространение в свободном пространстве рассчитано для мощности передатчика 150 Вт). Таким образом, решение о достоверности данных необходимо принимать в результате комплекса мер.

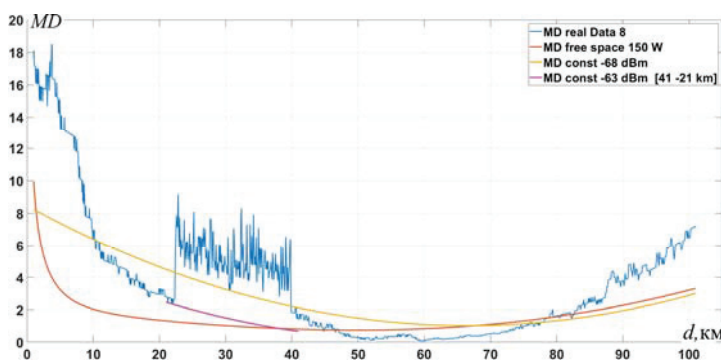


Рис. 3. График расстояния Махаланобиса (набор данных data8), P = 150 Вт

По представленной выше методике, расчет расстояния Махаланобиса необходимо выполнять для совместных значений переменных sdp и K . При выполнении моделирования выполним сначала расчет квадрата расстояния Махаланобиса для каждого вектора значений по отдельности, т.е. для каждой из переменных — СКО и КНД.

Для решения поставленной задачи, дистанция была разбита на участки длиной 1 км, с шагом 100 м. Это обусловлено тем, что турбовинтовые самолеты региональных авиалиний (Ан-24, L-410 и др.) имеют скорость 300...450 км/ч, та-

ким образом на дистанции в 1 км будет передано 8...12 сообщений АЗН-В с дискретностью 1 с по времени и 85...125 м по расстоянию. Для каждого участка дистанции длиной 1 км для всех накопленных данных выполнен расчет СКО — вектор накопленных данных. В качестве сигнала, имитирующего преднамеренное вмешательство, использовались значения, рассчитанные с помощью выражения (12) (кривая для свободного распространения, пульсации уровней мощности принятого сигнала отсутствуют). Следующим шагом был выполнен расчет квадрата расстояния Махаланобиса для вектора накопленных данных и вектора наблюдаемых данных. На рисунке 4 приведен график рассчитанной метрики MD^2 для наблюдаемых данных (наборы данных data3 и data4) и накопленных значений реальных данных полета ВС.

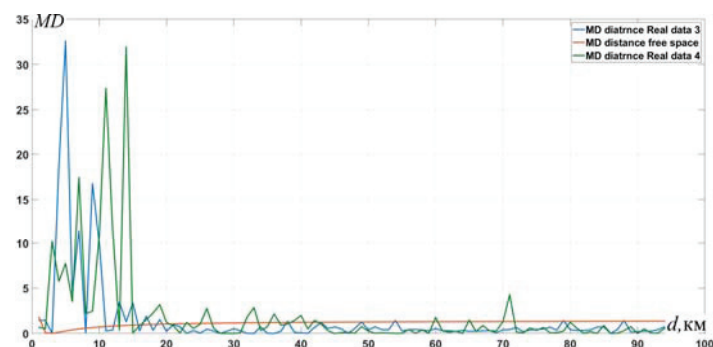


Рис. 4. График расстояния Махаланобиса (наборы данных data3 и data4), P = 150 Вт

По графикам, представленным на рис. 4 можно сделать вывод, что на удалении от 20 до 100 км значения, рассчитанные для свободного пространства, в основном, превышают значения метрики для реальных данных полета ВС. В зоне 0...20 км движение ВС не является прямолинейным.

Выполним расчет расстояния Махаланобиса для значений отношения КНД при меняющемся УМ. На рисунке 5 представлена зависимость УМ от удаления, рассчитанная по данным полетов МВЛ (L, R — условные курсы захода на посадку).

При выполнении моделирования были приняты некоторые ограничения и условия. В рассматриваемой задаче была применена модель приемной антенны 1090ES MMANA-GAL [23]. Известно, что ДН антенны имеет зависимость от высоты подвеса фазового центра антенны. Для формирования двух различных ДН в программе MMANA-GAL выполнено моделирование ДН одной антенны для свободного пространства и реальной земли с высотой подъема 0,35 м. На рис. 6 представлены две ДН антенны, рассчитанные для разных условий. По результатам моделирования были сняты значения зависимости КНД каждой ДН от УМ.

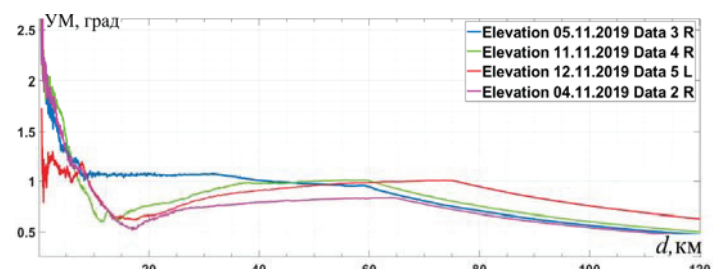


Рис. 5. Зависимость угла места от удаления для ВС, выполняющего полет МВЛ

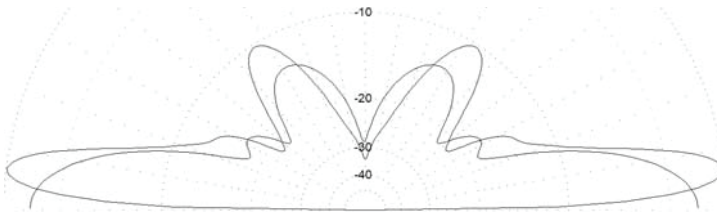


Рис. 6. ДН антенны 1090ES для свободного пространства и высоты подвеса 0,35 м

Для имеющихся данных реальных полетов ВС из сообщений 1090ES были извлечены значения высоты полета, по координатам ВС рассчитаны удаления для каждого воздушного судна. Данные были сняты с интервалом 1 с. По полученным данным были рассчитаны значения УМ для каждого принятого сообщения в соответствии со значениями высоты полета и удаления. Так как мы фиксируем отношение мощностей принятых сигналов, сами значения мощностей не имеют значения, поэтому при моделировании для каждого УМ были зафиксированы и использовались значения отношений КНД. По полученным значениям рассчитан квадрат расстояния Махаланобиса.

Преднамеренное вмешательство стационарного нарушителя для данной ситуации моделируется как постоянное отношение КНД для всех принимаемых сообщений о местоположении. При выполнении моделирования вмешательства, УМ по отношению к антенной системе был принят равным 0,9 град. На рисунке 7 представлены графики рассчитанного MD для данных реального полета и случая преднамеренного вмешательства.

В соответствии с методикой выполним моделирование и расчет квадрата расстояния Махаланобиса для двух векторов: накопленных значениях СКО уровней мощности сигнала и зависимости отношения КНД – метрика MD2.

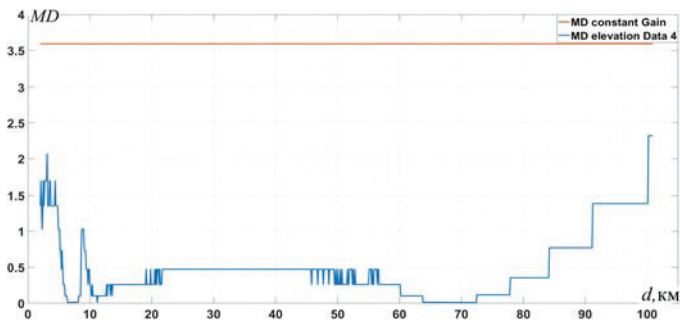


Рис. 7. График зависимости MD для ложного сигнала и данных реального полета ВС

В данной модели значения СКО уровней мощности принятых сигналов моделировалось как СКО кривой, рассчитанной с помощью выражения (12) для мощности 250 Вт. Значение УМ, по отношению к антенной системе, было принято равным 0,9 град. Результаты моделирования представлены на рис. 8.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что на удалении более 20 км, как правило (рис. 8а), наблюдается хорошая различимость данных реальных данных и данных модели преднамеренного вмешательства. В редких случаях (рис. 8б) модель работает нестабильно и обладает слабой различимостью, которая наблюдается на удалении менее 50...75 км.

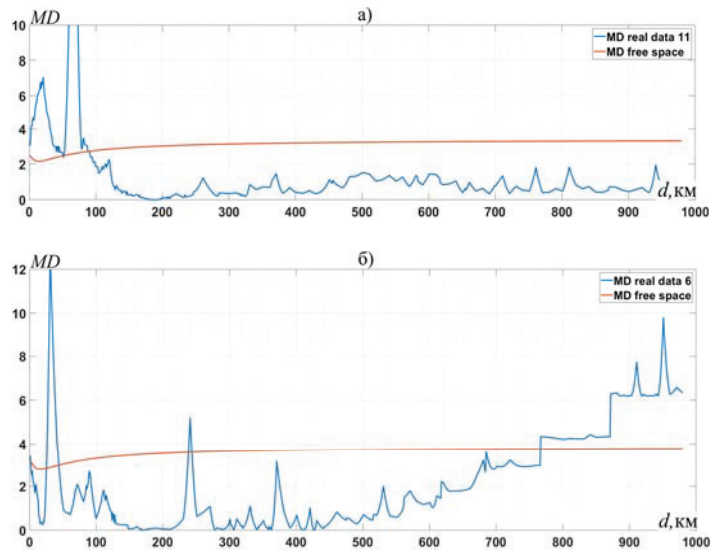


Рис. 8. Графики зависимости метрики MD2:
а – для нормальной работы модели;
б – нестабильной работы модели

Следует отметить, что, в соответствии с предложенной методикой, постоянно осуществляется мониторинг за выполнением условий:

- проверка координат наблюдаемого ВС на принадлежность ближней аэродромной зоне;
- уровень мощности сигнала соответствует удалению, не превышающему радиус выбранной ближней аэродромной зоне.

При выполнении одного из перечисленных событий осуществляется проверка условия стационарности и при выявлении неподвижного источника информации, его данные будут удалены, что увеличит различимость данных для выбранной ближней аэродромной зоны.

Представленная методика позволяет повысить информационную безопасность ЛПД 1090ES и выявить преднамеренное вмешательство в том числе и в случае использования злоумышленником сигналов переменной мощности.

В кратком изложении методика выявления ложных преднамеренно сформированных сигналов АЗН-В выглядит следующим образом:

- Рассчитывается метрика MD1 для уровней мощности накопленных и наблюдаемого сигнала и сравнивается с граничным значением. В случае значительной различимости повышается уровень доверия. Для слабой различимости уровень доверия к данным остается на том же уровне. При выявлении сигнала постоянной мощности присваивается соответствующий флаг.

– Для наблюдаемого ВС для которого либо уровень мощности принимаемого сигнала, либо координаты соответствуют ближней аэродромной зоне выполняется проверка постоянного отношения принятых на антенны (антенную систему) сигналов за время t .

– Для наблюдаемых на удалении более 20 км (т.е. на расстоянии, превышающем размеры ближней аэродромной зоны) выполняется расчет метрики MD2 по накопленным данным векторов СКО уровней мощности принимаемого сигнала и зависимости отношения коэффициентов усиления антенной системы.

– Результирующий вывод о достоверности данных с присвоением соответствующей степени доверия делается на основании комплексной верификации ВС, т.е. совокупности метрик *MD1* и *MD2*, а также проверки стационарности источника в ближней аэродромной зоне.

Выводы

Одним из недостатков, ограничивающих применение наземных станций АЗН-В является уязвимость линии передачи данных 1090ES к ложным преднамеренно сформированным сигналам. В статье предлагается методика, позволяющая выявлять такого рода сигналы. Метрики, рассчитанные по представленной методике (*MD1* и *MD2*), позволяют идентифицировать преднамеренное вмешательство, оценить и сравнить поведение наблюдаемых объектов с накопленными данными. Использование расстояния Махаланобиса в качестве метрики позволяет хорошо выявлять сигналы с постоянной мощностью.

Представленная методика требует незначительной модернизации антенной системы наземных станций, а также внесения изменений в программу обработки принимаемых сигналов. Эта модификация при небольших материальных затратах позволит увеличить защищенность системы АЗН-В от атак и повысить уровень безопасности полетов.

Литература

1. Global Air Navigation Plan (GANP) – Sixth Edition. URL: <https://www4.icao.int/ganpportal>. (дата обращения 6.06.2020).
2. Global air navigation plan 2016–2030. Doc. 9750 AN/963, Fifth Edition. ICAO, 2016. 142 p.
3. Global Aviation Safety Plan 2020-2022. Doc. 10004. ICAO, 2019. 144 p.
4. Поставка одноканальной наземной станции АЗН-В. СКБ «Контур». URL: <https://zakupki.kontur.ru/31806872353>. (дата обращения 6.06.2020).
5. Концепция «Внедрение автоматического зависимого наблюдения на основе единого стандарта с развитием до функционала многопозиционных систем наблюдения в Российской Федерации». URL: https://aeronet.aero/UserFiles/ContentFiles/2018-10-21_16-55-38_Об%20утверждении%20Концепции%20внедрения%20АЗН-В.pdf. (дата обращения 6.06.2020).
6. Aeronautical Surveillance Manual. Doc. 9924 AN/474. ICAO, 2017. 372 p.
7. Санкт-Петербургский «Альманах». Aviation Explorer. URL: <https://www.aex.ru/docs/3/2018/2/5/2714>. (дата обращения 6.06.2020).
8. Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И., Хамматов Р.Р. Обзор основных путей повышения безопасности системы АЗН-В // Научный вестник МГТУ ГА, 2019, том 22, №01. С. 39-50. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-1-39-50.
9. Flightware Prostick vs FlightAware Prostick Plus: Review.

URL: <https://www.rtl-sdr.com/flightaware-prostick-vs-flightaware-prostick-plus-review/> (дата обращения 6.06.2020).

10. Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) and traffic information services – broadcast (TIS-B). RTCA/DO-260B. RTCA, 2009. 1410 p.

11. Нахмансон Г.С. Пространственно-временная обработка широкополосных сигналов. Монография. М.: Радиотехника, 2015. 256 с.

12. Методические рекомендации по летным проверкам наземных средств радиотехнического обеспечения полетов, авиационной электросвязи и систем светосигнального оборудования гражданской авиации [утв. распоряжением Минтранса России №ИЛ–79-р от 24 авг. 2005 г., с изм. распоряжением Минтранса России №МС–82-р от 29 июня 2012 г.], 2012. 236 с.

13.eronautical telecommunications. Vol. IV. Surveillance and collision avoidance systems. Fifth Edition. ICAO, 2014. 216 p.

14. Рубцов Е. А., Калинин А.С., Григорьева Е.И. Анализ линии передачи данных автоматического зависимого наблюдения вещательного типа // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 6. С. 19-27. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10184.

15. Дюран Б., Оддел П. Кластерный анализ. М.: Статистика, 1977. 128 с.

16. Gorevoy A.V., Machikhin A.S. Optimal calibration of a prism-based videoendoscopic system for precise 3D measurements // Computer Optics, 2017. Vol. 41(4). Pp. 535-544.

17. Garg, M., Dhiman, G. A novel content-based image retrieval approach for classification using GLCM features and texture fused LBP variants. Neural Comput & Applic (2020). <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05017-z>. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00521-020-05017-z> (дата обращения 6.06.2020).

18. Torrecilla, J.L., Ramos-Carreño, C., Sánchez-Montañés, M. et al. Optimal classification of Gaussian processes in homo- and heteroscedastic settings. Stat Comput 30. – Pp. 1091–1111 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11222-020-09937-7>. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11222-020-09937-7>. (дата обращения 6.06.2020).

19. Yu, W., Ormerod, J.T. & Stewart, M. Variational discriminant analysis with variable selection. Stat Comput 30. Pp. 933–951 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11222-020-09928-8>. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11222-020-09928-8>. (дата обращения 6.06.2020).

20. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/stats/mahal.html> (дата обращения 6.06.2020)

21. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/std.html> (дата обращения 6.06.2020)

22. Calculation of free-space attenuation. Recommendation ITU-R P.525-4, 2019. 6 p.

23. MMANA. URL: <https://mmana.home.blog/2018/11/24/1090-mhz-franklin-collinear/> (дата обращения 6.06.2020).

METHOD OF DETECTING FALSE INTENTIONALLY GENERATED ADS-B SIGNALS

Andrey S. Kalintsev, Arkhangelsk air traffic management center, North-West Air Navigation branch, "State Air Traffic Management Corporation of the Russian Federation", Mezen, Russia, kas4job@gmail.com
Evgeny A. Rubtsov, Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia, rubtsov.spb.guga@rambler.ru

Abstract

The International Civil Aviation Organization recommends to use advanced surveillance systems: multi-sensor surveillance system and automatic dependent surveillance broadcast. Ground stations for automatic dependent surveillance have a relatively low cost and can partially replace secondary surveillance radars in the future. Currently, the development of automatic dependent surveillance has slowed down, because the system has vulnerabilities: the complete openness of the 1090ES data link, the lack of encryption and protection against false intentionally generated signals. There are a large number of equipment on the market for receiving and processing on-board transponder signals; for specialists it's not difficult to assemble transmitting equipment that generates such signals. This poses a serious threat to information security and flight safety. The article proposes a method that allows, through a comprehensive analysis of the aircraft trajectory and the nature of the level of received signals, identify false signals generated intentionally. The proposed technique is based on identification of abnormal characteristics of false signals. To search and identify anomalous characteristics, the Mahalanobis distance is estimated. To increase the distinguishability of data and to detect intentional interference, it is necessary to modernize the antenna system of the ground station by introducing an additional antenna with a different radiation pattern. The false signal generated by the ground source is detected by a constant value of the antenna directivity ratio. The developed technique was implemented in the MATLAB software and applied to evaluate real data received from the ground-based automatic dependent surveillance station located in the Arkhangelsk air traffic management center. The power levels of the received messages of automatic dependent observation received from L-410 aircraft operating in the area of local air lines were used as reference values.

Keywords: flight safety, ADS-B, data link, 1090ES, Mahalanobis distance, antenna pattern.

References

1. Global Air Navigation Plan (GANP) - Sixth Edition. URL: <https://www4.icao.int/ganportal>. (date of the application 6.06.2020).
2. Global air navigation plan 2016-2030. Doc. 9750 AN/963, Fifth Edition. ICAO, 2016. 142 p.
3. Global Aviation Safety Plan 2020-2022. Doc. 10004. ICAO, 2019. 144 p.
4. Equipment supply one-channel ground station ADS-B. URL: <https://zakupki.kontur.ru/31806872353>. (date of the application 6.06.2020).
5. The concept of "Implementation of automatic dependent surveillance based on a single standard with the development of the functionality of multi-sensor surveillance systems in the Russian Federation". URL: https://aeronet.aero/UserFiles/ContentFiles/2018-10-21_16-55-38_Об%20утверждении%20Концепции%20внедрения%20АЗН-В.pdf. (date of the application 6.06.2020).
6. Aeronautical Surveillance Manual. Doc. 9924 AN/474. ICAO, 2017. 372 p.
7. Saint-Petersburg's "Almanac". Aviation Explorer. URL: <https://www.aex.ru/docs/3/2018/2/5/2714>. (date of the application 6.06.2020).
8. Kosianchuk V.V., Selvesiuk N.I., Khammatov R.R. An overview of the main ways to improve the ADS-B system security. *Civil Aviation High Technologies*, 2019. Vol. 22. No.01. P. 39-50. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-1-39-50.
9. FlightAware Prostick vs FlightAware Prostick Plus: Review. URL: <https://www.rtl-sdr.com/flightaware-prostick-vs-flightaware-prostick-plus-review/> (date of the application 6.06.2020).
10. Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance - broadcast (ADS-B) and traffic information services - broadcast (TIS-B). *RTCA DO-260B*. RTCA, 2009. 1410 p.
11. Nakhmanson G.S. Spatial-temporal processing of broadband signals. Monograph. Moscow: Radiotekhnika, 2015. 256 p.
12. Guidelines for flight inspections of ground-based radio-technical flight support equipment, aeronautical telecommunications, and civil aviation lighting systems [approved by decree of the Ministry of Transport of Russia №IL-79-r of August 24, 2005, as amended by the decree of the Ministry of Transport of Russia №MS-82-r of June 29, 2012], 2012. 236 p.
13. Aeronautical telecommunications. Vol. IV. Surveillance and collision avoidance systems. Fifth Edition. ICAO, 2014. 216 p.
14. Rubtsov E.A., Kalintsev A.S., Grigoreva E.I. Data link analysis of automatic dependent surveillance-broadcast. *H&ES Research*. Vol. 10. No. 6, 2018. Pp. 19-27. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10184.
15. Duran B.S., Odell P.L. Cluster analysis, a survey. Moscow: Statistic, 1977. 128 p.
16. Gorevoy A.V., Machikhin A.S. Optimal calibration of a prism-based videoendoscopic system for precise 3D measurements. *Computer Optics*, 2017. Vol. 41(4). Pp. 535-544.
17. Garg, M., Dhiman, G. A novel content-based image retrieval approach for classification using GLCM features and texture fused LBP variants. *Neural Comput & Applic* (2020). <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05017-z>. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00521-020-05017-z>. (date of the application 6.06.2020).
18. Torrecilla, J.L., Ramos-Carreño, C., Sánchez-Montaño, M. et al. Optimal classification of Gaussian processes in homo- and heteroscedastic settings. *Stat Comput* 30. P. 1091-1111 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11222-020-09937-7>. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11222-020-09937-7>. (date of the application 6.06.2020).
19. Yu, W., Ormerod, J.T. & Stewart, M. Variational discriminant analysis with variable selection. *Stat Comput* 30. P. 933-951 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11222-020-09928-8>. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11222-020-09928-8>. (date of the application 6.06.2020).
20. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/stats/mahal.html> (date of the application 6.06.2020)
21. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/std.html> (date of the application 6.06.2020)
22. Calculation of free-space attenuation. Recommendation ITU-R P.525-4, 2019. 6 p.
23. MMANA. URL: <https://mmana.home.blog/2018/11/24/1090-mhz-franklin-collinear/> (date of the application 6.06.2020).