

Исследование изменения частоты Доплера для обоснования возможности различения радиосигналов на борту робототехнического комплекса

Д. А. Лесняк, С. А. Матвеев, Д. С. Кузьмин, Р. О. Епифанов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

vka@mil.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования изменения частоты Доплера на борту робототехнического комплекса космического базирования. Приведенные результаты позволяют обосновать принципиальную возможность различения радиосигнала управления от наземного радиоэлектронного средства на сигнальном уровне функционирования бортовой аппаратуры робототехнического комплекса космического базирования при принятых допущениях.

Ключевые слова: частота Доплера; радиосигнал управления; робототехнический комплекс космического базирования; сигнальный уровень защиты

I. ВВЕДЕНИЕ

Современный этап эксплуатации робототехнических комплексов (РК) характеризуется значительным увеличением потоков информационного обмена по радиоканалам, в том числе и необходимых для их управления. При этом РК космического базирования обеспечивают решения задач по предоставлению наземным потребителям широкого спектра услуг в области связи, телевидения, навигации, метеорологии, геодезии, природных ресурсов, экологии, картографии, оценки состояния инфраструктуры промышленных объектов и сельскохозяйственных угодий [1]. Управление такими РК осуществляется по радиоканалу и представляет собой сложный технологический процесс, в котором участвуют как наземные, так и бортовые радиоэлектронные средства [2, 3].

В силу пространственной электромагнитной доступности радиоканалов, создаются условия для реализации попыток деструктивных воздействий в виде передачи нарушителем имитируемых сигналов по радиоканалу управления с целью нарушения нормального функционирования бортовой аппаратуры РК космического базирования [4]. Для обнаружения таких попыток и предотвращения негативных последствий в бортовой аппаратуре РК космического базирования в статьях [5, 6] обосновано использование многоуровневого принципа построения системы защиты. При этом одним из уровней защиты в такой системе является сигнальный уровень, который по своему характеру является физический, а различение принимаемых истинных и имитируемых сигналов радиоуправления возможно на основе анализа параметров принимаемых радиосигналов. Целью статьи является обоснование возможности различения истинного и имитируемого радиосигнала на сигнальном

уровне функционирования бортовой аппаратуры РК космического базирования на основе изменения доплеровского сдвига частоты принимаемого сигнала, зависящего от параметров относительного движения объекта управления и пункта радиоуправления.

II. ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗЛИЧЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ НА БОРТУ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Рассмотрим случай, при котором наземное радиоэлектронное средство (РЭС) управления осуществляет штатное управление РК космического базирования с помощью управляющих воздействий, передаваемых по радиоканалу, а наземная станция имитации управления нарушителя (СИН) пытается передать имитируемые управляющие воздействия на РК в условиях пресечения зон радиовидимости (ЗРВ). Пространственная электромагнитная доступность радиоканала управления РК космического базирования позволяет нарушителю в течение длительного времени анализировать структуру сигнала (несущая частота излучения, вид модуляции и т.п.), используемого наземным РЭС для передачи управляющих воздействий в пересекающихся ЗРВ с СИН нарушителя. Одним из признаков для обнаружения попыток деструктивных воздействий на канал управления РК может быть использован доплеровский сдвиг несущей частоты радиосигнала, принимаемого бортовой аппаратурой РК космического базирования.

Вследствие расположения РЭС и СИН на различных позициях в каждый момент времени t доплеровские сдвиги частоты их сигналов $F_{д1}$ и $F_{д2}$ соответственно, принимаемые бортовой аппаратурой РК космического базирования, будут различаться. Это позволяет различать истинные и имитируемые нарушителем радиосигналы за счет различия функций изменения частоты принимаемых сигналов: $f(t)=f_0+F_{д1}(t)$ и $f(t)=f_0+F_{д2}(t)$, где f_0 – несущая частота радиосигнала в канале «Земля–РК», обусловленного различием функций изменения доплеровских сдвигов частоты $F_{д1}(t)$ и $F_{д2}(t)$ [7]. Для успешной реализации попыток деструктивных воздействий к радиоканалу управления РК нарушителю необходимо имитировать частоту радиосигнала наземного РЭС с учетом функции изменения ее доплеровского сдвига $F_{д1}(t)$.

Орбитальное движение РК космического базирования с высотой орбиты $H_{РК}$ относительно

наземного РЭС характеризуется функцией изменения во времени t радиальной скорости РК $V_R(t)$, соответствующей высоте орбиты. Будем полагать, что нарушитель для прогнозирования орбитального движения РК космического базирования использует набор элементов, представленный в двухстрочном формате TLE -данных. Тогда функция изменения во времени t имитируемой нарушителем радиальной скорости $V_{RTLE}(t)$, определяется высотой орбиты РК H_{TLE} , определяемой по TLE -данным, которая с учетом погрешности прогнозирования положения РК на орбите ΔH составляет: $H_{TLE} = H_{PK} \pm \Delta H$. В свою очередь погрешность имитации нарушителем в момент времени t доплеровского сдвига частоты радиосигнала в канале «Земля-РК» $\Delta F_d(t)$, соответствующая разности истинной и имитируемой радиальных скоростей РК, $\Delta V_R(t) = V_R(t) - V_{RTLE}(t)$, составит $\Delta F_d(t) = -f_0 \Delta V_R(t) / c$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, f_0 – несущая частота радиосигнала. Характер зависимости от времени t погрешности имитации частоты радиосигнала в канале «Земля-РК» $\Delta F_d(t)$ определяется зависимостью от времени t разности истинной и имитируемой радиальных скоростей РК $\Delta V_R(t)$. Следовательно, различие истинного и имитируемого радиосигнала на сигнальном уровне может быть основано на анализе условий приема сигналов бортовой аппаратурой РК при его прохождении в пересекающихся ЗРВ наземных РЭС и СИН с учетом предполагаемой точности $\pm \Delta H$ определения нарушителем по TLE -данным высоты орбиты РК космического базирования, определяющей погрешность $\pm \Delta F_d$ имитации доплеровского сдвига частоты радиосигнала управления в канале «Земля-РК».

В большинстве случаев при проведении сеансов управления с низкоорбитальными РК, движущимися в общем случае по эллиптическим орбитам с малыми эксцентриситетами, часть траектории РК в пределах ЗРВ РЭС близка к траектории движения РК по круговой орбите [2, 8]. Поэтому для описания движения РК в пересекающихся ЗРВ РЭС и СИН рассматривалось простая баллистическая модель невозмущенного движения РК по круговой орбите с высотой, центр которой совпадает с центром Земли. Диапазон значений высот орбит РК H_{PK} составлял от 500 км до 1500 км, что охватывает практически весь диапазон высот орбит низкоорбитальных РК космического базирования.

Прохождение РК в ЗРВ наземного РЭС характеризуется геоцентрическим углом δ_0 между пунктом расположения РЭС и трассой наблюдаемого РК проекцией орбиты на поверхность Земли. Геоцентрический угол δ_0 может принимать значения в пределах $0 \leq \delta_0 < \delta_{0max}$, где $\delta_{0max} = \arccos(R_3 / (R_3 + H_{PK}))$, где $R_3 = 6371$ км – радиус Земли. Максимально возможный геоцентрический угол δ_{0max} соответствует прохождению траектории движения РК на линии местного горизонта наземного РЭС. Тогда положение траектории движения РК относительно пунктов расположения РЭС и СИН определяются соответствующими геоцентрическими углами δ_{01} и δ_{02} . При определении значений геоцентрических углов и расстояния между РЭС и СИН на поверхности Земли учитывались диапазон значений высот орбит РК и предполагаемое расположение СИН, которые могут быть использованы нарушителем для передачи деструктивных управляющих воздействий.

Доплеровский сдвиг частоты F_d радиосигнала наземного РЭС, принимаемого на РК, зависит от радиальной скорости движения РК V_R : $F_d = -f_0 V_R / c$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, f_0 – несущая частота радиосигнала в канале «Земля-РК». При проведении исследования диапазон значений несущей частоты f_0 задавался от 7000 МГц до 7200 МГц, что соответствует перпендикулярно литер частот, используемых в существующих наземных РЭС [3].

При прохождении РК в зоне радиовидимости наземного РЭС зависимость доплеровского сдвига частоты $F_{d1}(t)$ для радиосигналов управления РК определяется зависимостью радиальной скорости движения РК относительно РЭС $V_R(t)$, которая для принятой баллистической модели движения РК описывается выражением [2, 8]:

$$V_R(t) = \sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H_{PK}}} \cdot \frac{R_3 \cos \delta_0 \sin \left(\sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H_{PK}}} \frac{t - t_0}{R_3 + H_{PK}} \right)}{\sqrt{R_3^2 + (R_3 + H_{PK})^2 - 2R_3(R_3 + H_{PK}) \cos \delta_0 \cos \left(\sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H_{PK}}} \frac{t - t_0}{R_3 + H_{PK}} \right)}} \quad (1)$$

где $\mu = 3,986 \cdot 10^5$ км³/с² – гравитационная постоянная, t_0 – время прохождения РК точки траверза.

Если погрешность имитации радиосигнала управления РК нарушителем определяется использованием им приближенных значений TLE -данных для высоты орбиты РК H_{TLE} , то при прохождении РК в зоне радиовидимости РЭС зависимость доплеровского сдвига частоты $F_{d2}(t)$ для имитируемых радиосигналов управления РК будет определяться зависимостью имитируемой радиальной скорости движения РК относительно РЭС, которая определяется выражением [2, 8]:

$$V_{R_{не}}(t) = \sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H_{не}}} \cdot \frac{R_3 \cos \delta_0 \sin \left(\sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H_{не}}} \frac{t - t_0}{R_3 + H_{не}} \right)}{\sqrt{R_3^2 + (R_3 + H_{не})^2 - 2R_3(R_3 + H_{не}) \cos \delta_0 \cos \left(\sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H_{не}}} \frac{t - t_0}{R_3 + H_{не}} \right)}} \quad (2)$$

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ ДОПЛЕРА В БОРТОВОЙ АППАРАТУРЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ПРИЕМЕ РАДИОСИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ

На рис. 1 приведены расчетные зависимости изменения во времени доплеровских сдвигов частоты $F_{d1}(t)$ и $F_{d2}(t)$ радиосигналов, принимаемых бортовой аппаратурой РК, при прохождении его в пересекающихся ЗРВ РЭС и СИН в общем случае, когда $\delta_{01} \neq \delta_{02}$ и $t_{01} \neq t_{02}$. При расчетах полагалось $H_{PK} = 1000$ км, $f_0 = 7200$ МГц, $\delta_{01} = 0^0$, $\delta_{02} = 6.4^0$. Кривая 1 соответствует доплеровскому сдвигу частоты $F_{d1}(t)$ радиосигнала РК, кривая 2 соответствует доплеровскому сдвигу частоты

$F_{д2}(t)$ имитируемых СИН нарушителя радиосигналов управления РК при отсутствии прогноза параметров орбитального движения РК, кривые 3 соответствуют доплеровскому сдвигу частоты $F_{д2}(t)$ имитируемых СИН нарушителя радиосигналов управления РК при использовании TLE -данных каталога $NORAD$ для прогнозирования орбитальных параметров движения РК и погрешности $\pm\Delta F_{д}$ имитации доплеровского сдвига частоты радиосигнала РК.

Доплеровские сдвиги частоты $F_{д1}(t)$ и $F_{д2}(t)$ радиосигналов, принимаемых бортовой аппаратурой РК в момент времени t , отличаются на величину $\Delta F(t)=F_{д1}(t)-F_{д2}(t)$. Это является следствием отличия для РЭС и СИН нарушителя времен прохождения РК точек траверза t_{01} и t_{02} и геоцентрических углов δ_{01} и δ_{02} , от которых зависят функции изменения доплеровского сдвига частоты $F_{д1}(t)$ и $F_{д2}(t)$, и использования нарушителем в качестве начальных условий TLE -данных каталога $NORAD$ для прогнозирования параметров орбитального движения РК.

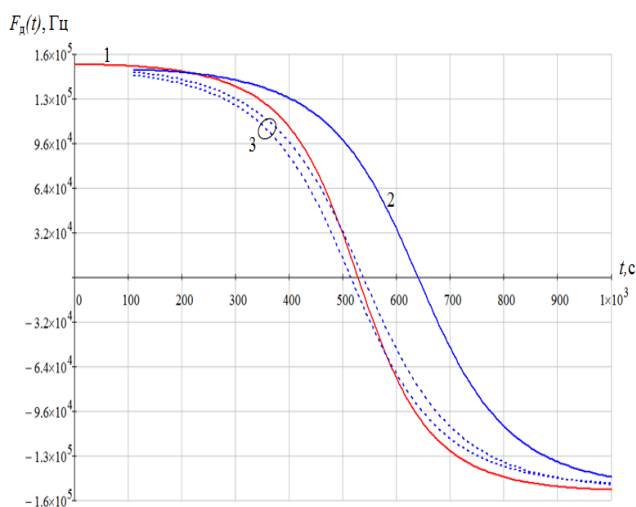


Рис. 1. Изменение во времени доплеровского сдвига частоты радиосигналов, принимаемых бортовой аппаратурой РК

На рис. 2 приведены расчетные зависимости разности частот $\Delta F(t)$, соответствующие зависимостям $F_{д1}(t)$ и $F_{д2}(t)$, приведенным на рис. 1. Кривая 1 соответствует разности частот $\Delta F(t)$ при имитации СИН нарушителя радиосигналов управления РК без прогноза параметров орбитального движения РК, кривые 2 соответствуют разности частот $\Delta F(t)$ при имитации СИН нарушителя радиосигналов управления РК с прогнозом параметров орбитального движения РК с использованием в качестве начальных условий TLE -данных каталога $NORAD$ и погрешности $\pm\Delta F_{д}$ имитации доплеровского сдвига частоты радиосигнала РК.

Таким образом, при принятых допущениях относительно точности прогнозирования нарушителем доплеровского сдвига частоты радиосигналов РК космического базирования в рассмотренном случае возможно различие истинных и имитируемых сигналов управления РК на сигнальном уровне анализа их прохождения в приемном устройстве бортовой аппаратуры РК. Обнаруженный имитируемый радиосигнал управления блокируется на сигнальном уровне функционирования многоуровневой системой защиты и при этом фиксируется попытка деструктивных воздействий на радиоканал управления РК космического базирования.

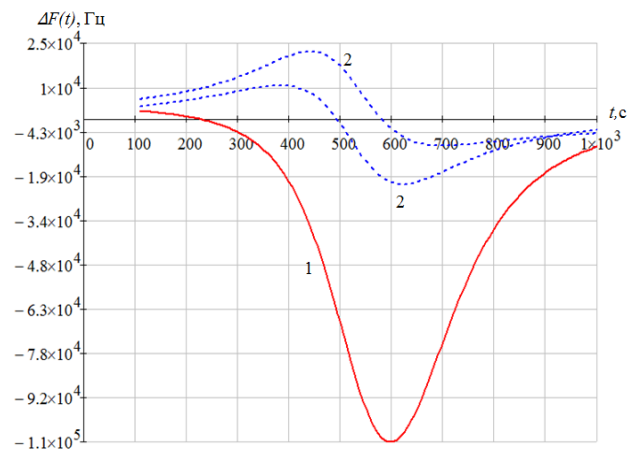


Рис. 2. Изменение во времени разности доплеровского сдвига частоты радиосигналов, принимаемых бортовой аппаратурой РК

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предотвращения негативных последствий в бортовой аппаратуре РК космического базирования при приеме имитируемого радиосигнала имеет исключительно важное значение для успешного целевого применения КА в рамках решения целевых задач. Представленные в данной статье результаты проведенного исследования показывают принципиальную возможность различия истинного и имитируемого нарушителем радиосигнала в бортовой аппаратуре РК космического базирования на сигнальном уровне функционирования многоуровневой системы защиты. Условием обнаружения попыток деструктивных воздействий на радиоканал управления РК космического базирования на сигнальном уровне является поддержание в бортовой аппаратуре альманаха значений частоты радиосигналов (с учетом доплеровского сдвига частоты) наземных РЭС для различных вариантов прохождения РК в их ЗРВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Макаренко Д.М., Потюпки А.Ю. На орбитальных рубежах. М.: Academia, 2008. 208 с.
- [2] Управление космическими полетами: учеб. пособие: ч. 1 / Под общ. ред. Л.Н. Лысенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 426 с.
- [3] Молотов Е.П. Наземные радиотехнические системы управления космическими аппаратами. М.: Физматлит, 2004. 256 с.
- [4] Лесняк Д.А., Матвеев С.А. Обнаружение вторжений в радиоканал управления робототехническим комплексом на логическом уровне функционирования бортовой многоуровневой системы защиты // Сборник трудов 77-ой научно-технической конференции научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова НР 1(77) 2022, С. 88–90.
- [5] Мальцев Г.Н., Матвеев С.А. Исследование защищенности системы командного радиоуправления подвижным объектом с использованием марковской модели преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. №677. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2021. С. 153–164.
- [6] Матвеев С.А. Модель системы обнаружения вторжений в радиоканал управления робототехническим комплексом // Сборник трудов 76-ой научно-технической конференции научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова НР 1(76) 2021, С. 136–139.
- [7] Спутниковая связь и вещание: Справ. / Под ред. Л.Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1997. 528 с.
- [8] Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 528 с.