

УДК 621.398 DOI 10.30894/issn2409-0239.2023.10.2.73.82 EDN OGMRSB

Когерентное сложение разнодиапазонных сигналов для мониторинга космического пространства территориально разнесенными наземными комплексами

Д. В. Левин, к. т. н., *vka@mil.ru*

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Г. Н. Мальцев, д. т. н., профессор, *vka@mil.ru*

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Российская Федерация

А. В. Паршуткин, д. т. н., профессор, *vka@mil.ru*

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается подход к решению задач мониторинга околоземного космического пространства при совместной обработке радиолокационной информации в сети наземных радиолокационных станций обзора пространства. Предложен порядок формирования единого опорного радиолокационного сигнала для пары радиолокационных станций обзора пространства на основе когерентного сложения отсчетов разнодиапазонных сигналов. Представлены результаты имитационного моделирования селекции космических объектов на фоне ложных отметок, обусловленных ретранслированными помехами, при реализации алгоритма совместной обработки радиолокационных сигналов от двух разнесенных радиолокационных станций обзора пространства при решении задач мониторинга околоземного космического пространства.

Ключевые слова: космический мусор, мониторинг космического пространства, радиолокационная станция, фазоманипулированный сигнал, функция корреляции

Coherent Addition of Different-Range Signals for Space Monitoring by Territorially Separated Ground Complexes

D. V. Levin, *Cand. Sci. (Engineering)*, *vka@mil.ru*

Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation

G. N. Maltsev, *Dr. Sci. (Engineering)*, *Prof.*, *vka@mil.ru*

Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation

A. V. Parshutkin, *Dr. Sci. (Engineering)*, *Prof.*, *vka@mil.ru*

Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article explores an approach for addressing the challenges associated with monitoring near-Earth space through the joint processing of radar information from a network of ground-based radar stations dedicated to space surveillance. A novel procedure is proposed for generating a unified reference radar signal by coherently summing signals of varying ranges obtained from multiple radar stations. Simulation modeling results are presented to demonstrate the efficacy of this algorithm in detecting space objects amidst false signals caused by retransmitted interference. The proposed approach offers a viable solution for monitoring near-Earth space by leveraging joint radar signal processing from two spatially separated radar stations.

Keywords: space debris, space monitoring, radar station, phase-shift keyed signal, correlation function

Введение

Активное использование космического пространства при организации спутниковой связи и ретрансляции данных, космической радионавигации и наблюдения привело к образованию на околоземных орбитах полета большого количества объектов техногенного происхождения. Так, отработанные ступени ракет-носителей, потерявшие управление космические аппараты (КА) и различные мелкие обломки космической техники, образовавшиеся в результате столкновений или разрушений, привели к образованию вокруг Земли случайно распределенных скоплений космического мусора. Для осуществления безопасного применения существующих и организации вывода на орбиту новых КА возрастает роль мониторинга околоземного космического пространства, который может осуществляться как космическими средствами наблюдения, так и наземными информационно-измерительными средствами [1].

Основными наземными средствами мониторинга околоземного космического пространства являются оптико-электронные комплексы и радиолокационные станции (РЛС) обзора пространства. Применение оптико-электронных комплексов возможно при благоприятных погодных условиях и только в ночное время суток. Применение РЛС обзора пространства в меньшей степени зависит от указанных факторов и позволяет получать круглосуточно координатную и некоординатную информацию о космических объектах (КО), траектории которых проходят в пределах их зон радиовидимости. При этом, в отличие от оптико-электронных комплексов, наземные РЛС обзора пространства подвержены влиянию радиоэлектронных помех, что неминуемо ведет к снижению результативности их применения при решении задач мониторинга околоземного космического пространства. При радиолокационном наблюдении околоземного космического пространства в условиях высокой концентрации мелкого космического мусора неминуемо будут возникать случайные переотражения зондирующих сигналов, приводящие к формированию искаженной радиолокационной информации. Для повышения ее достоверности может применяться подход совместного наблюдения несколькими РЛС обзора

пространства [1, 2]. Поэтому исследования в области оценивания результативности мониторинга космического пространства сетью наземных РЛС обзора пространства в условиях наличия на низких околоземных орбитах полета скоплений мелкого космического мусора, приводящего к образованию многократных случайных переотражений радиолокационных сигналов, являются актуальными.

Применение сети радиолокационных станций обзора пространства для мониторинга околоземного космического пространства

Объединение в сеть нескольких РЛС обзора пространства, в том числе разнодиапазонных, позволяет повысить его дальность действия в сравнении с дальностью действия отдельной РЛС обзора пространства и потенциально может обеспечить радиолокационное наблюдение КО на удаленностях до геостационарной орбиты [2]. Обязательными условиями при этом являются наличие пересекающихся зон обзора размещенных РЛС обзора пространства и реализация алгоритмов комплексной обработки радиолокационной информации от них (рис. 1).

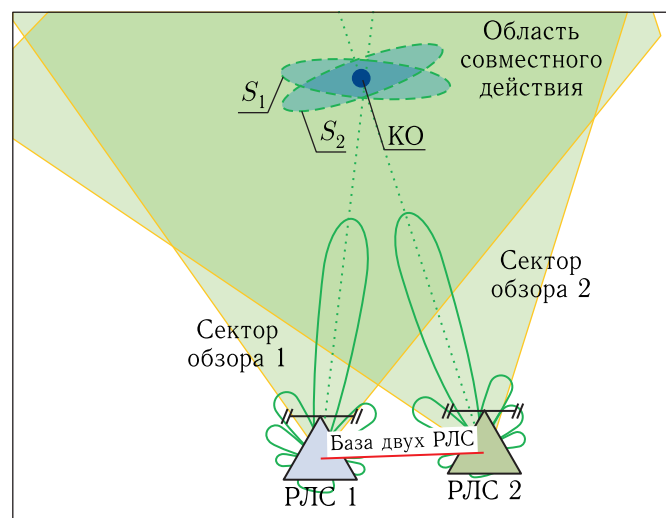


Рис. 1. Взаимное расположение пары радиолокационных станций обзора пространства

Второе условие подразумевает наличие схем накопления принимаемых радиолокационных сигналов в каждой отдельной РЛС обзора пространства, системы синхронизации их радиолокационных измерений и специальных линий связи для высокоскоростной передачи радиолокационной информации между разнесенными РЛС [3].

Измерение местоположения цели, одновременно наблюдаемой двумя разными РЛС обзора пространства, будет осуществляться в пределах эллипсоидов рассеяния S_1 и S_2 каждой станции. Размеры эллипсоидов рассеяния определяются потенциальными точностями радиолокационных измерений каждой станции и условиями радиоэлектронной обстановки в районе их размещения.

Усложнение задачи мониторинга космического пространства наземными РЛС обзора пространства обусловлено рядом факторов. Во-первых, это связано с развертыванием на низких околоземных орбитах многоспутниковых космических систем, предназначенных для организации высокоскоростной передачи данных между абонентами, находящимися в различных точках поверхности Земли. Например, американской компанией SpaceX для обеспечения глобального высокоскоростного широкополосного доступа в Интернет развернута космическая система StarLink на базе нескольких тысяч низкоорбитальных малых КА, выстроенных в 24 орбитальных плоскостях по принципу «цепочка». Кроме того, зарубежными странами развертываются низкоорбитальные системы спутниковой связи OrbComm и OneWeb с числом КА до нескольких сотен.

Во-вторых, это связано с постоянным увеличением на околоземных орбитах космического мусора. Отечественными и зарубежными средствами мониторинга космического пространства отслеживаются десятки тысяч фрагментов космического мусора, включая неработающие КА, элементы ступеней ракет и другие неизвестные объекты. В околоземном космическом пространстве находится множество мелких элементов диаметром от 1 до 10 см и более 100 млн частиц размером более 1 мм. Чем больше КА выводится на околоземные орбиты, тем больше на околоземных орбитах оказывается фрагментов ракетно-космической техники, образующихся при выведении, тем больше возникает возможностей для столкновения КО, что, в свою очередь,

неминуемо приводит к образованию еще большего количества космического мусора [4–6].

Указанные факторы естественным путем ведут к усложнению фоноцелевой обстановки в околоземном космическом пространстве, мониторинг которой осуществляется совокупностью РЛС обзора пространства. Также мешающим фактором для наблюдения за околоземным космическим пространством с привлечением РЛС обзора пространства является многократное увеличение количества радиоэлектронных средств различного назначения, размещаемых в воздушно-космическом пространстве или на земной поверхности. Функционирование разнообразных радиоэлектронных средств неминуемо приводит к усложнению электромагнитной обстановки в целом и, в частности, к взаимному помеховому воздействию на приемные устройства РЛС обзора пространства [5–7].

Формирование единого опорного сигнала для двух разнодиапазонных радиолокационных станций обзора пространства

В РЛС обзора пространства в основном применяются амплитудно-модулированные сигналы, сигналы с линейной частотной модуляцией и фазоманипулированные дискретно-кодированные сигналы. Радиолокационные сигналы с линейной частотной модуляцией представляют собой сигналы, у которых в течение длительности одного импульса мгновенная частота изменяется по линейному закону, а фаза колебания по квадратичному закону в зависимости от времени. Фазоманипулированные сигналы представляют собой «совокупность сомкнутых прямоугольных парциальных радиоимпульсов одинаковой длительности и частоты при ограниченном числе различающихся возможных значений начальной фазы колебаний» [14]. Автокорреляционные функции указанных типов сигналов имеют ярко выраженные корреляционные пики по сравнению с уровнями боковых лепестков [8, 9]. При достаточно узком центральном пике автокорреляционной функции появляется возможность измерения с высокой точностью дальности от РЛС обзора пространства до КО наблюдения.

Один из вариантов обеспечения высокой точности измерения дальности до КО основан на использовании нескольких разнесенных по частоте фазоманипулированных сигналов, излучаемых и принимаемых независимо функционирующими РЛС обзора пространства [2,3]. Формирование единого опорного сигнала для двух РЛС обзора пространства проводится на основе когерентного сложения отсчетов фазоманипулированных сигналов двух разнесенных РЛС, работающих на разных несущих частотах. Для этого проводится операция объединения сигналов, при которой сохраняются мгновенные фазы каждого из парциальных сигналов. Достигается такой эффект путем формирова-

ния синхронизированных по моментам времени отсчетов парциальных сигналов с одинаковой высокочастотной дискретизацией. Друг с другом сигналы на разных частотах, естественно, не когерентны, но операция сложения сохраняет их когерентность относительно исходных. Поэтому под когерентным сложением двух разнесенных по частоте сигналов понимается суммирование синхронизированных по времени отсчетов этих сигналов. Схема формирования единого опорного сигнала для двух РЛС обзора пространства представлена на рис. 2. Здесь введены следующие обозначения: $S_{\text{оп}}(t)$ — опорный сигнал, сформированный в результате суммирования двух разнесенных по частоте фазоманипули-

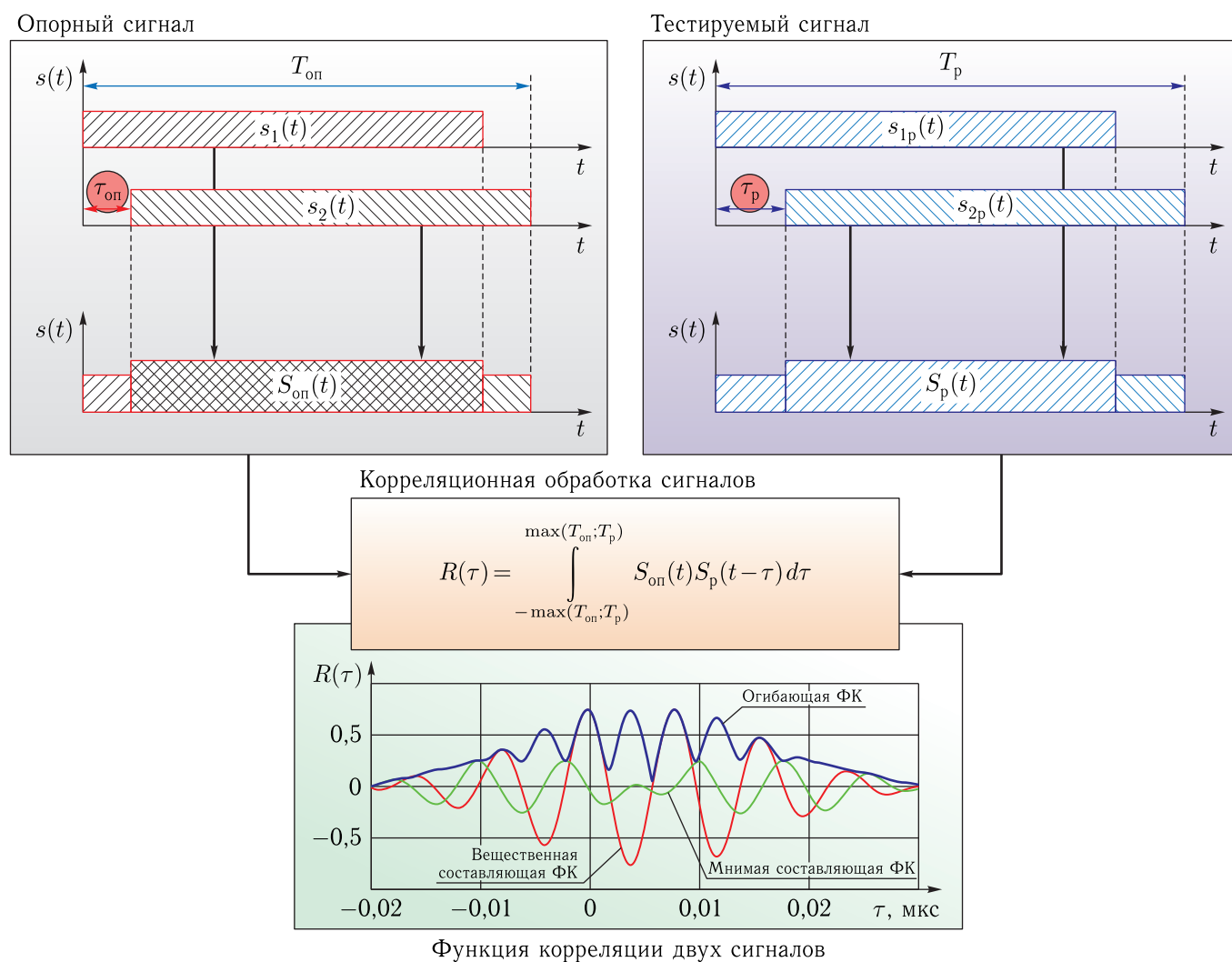


Рис. 2. Схема формирования функции корреляции суммарного радиолокационного сигнала, сформированного двумя фазоманипулированными сигналами, разнесенными по частоте

рованных сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$, имеющих одинаковый закон изменения фазы; $S_p(t)$ — принятый сигнал, сформированный в результате суммирования двух разнесенных по частоте фазоманипулированных сигналов $s_{1p}(t)$ и $s_{2p}(t)$, принятых приемными устройствами РЛС, причем $s_{ip}(t)$, $i = 1, 2$, аддитивная смесь фазоманипулированного сигнала $s_i(t)$ и тепловых шумов $\eta_i(t)$ приемного устройства; $\tau_{оп}$ — длительность смещения по времени момента начала сигнала $s_2(t)$ относительно момента начала фазоманипулированного сигнала $s_1(t)$; τ_p — длительность смещения по времени момента начала сигнала $s_{2p}(t)$ относительно момента начала дискретного сигнала $s_{1p}(t)$; $T_{оп}$, T_p — длительности опорного и принятого сигналов.

Для случая, когда $\eta_i(t) > 0$ и тепловыми шумами приемных устройств можно пренебречь, в результате корреляционной обработки опорного $S_{оп}(t)$ и принятого $S_p(t)$ сигналов будет сформирована функция корреляции $B_\Sigma(\tau)$ сигнала $S_{оп}(t)$ и его смещаемой во времени копии $S_p(t) = S_{оп}(t - \tau)$. На рис. 3 представлены вещественные B_{Re1} и мнимые B_{Im1} составляющие комплексной функции корреляции одного фазоманипулированного сигнала $s_1(t)$, сформированные в результате смещения энергетического спектра сигнала в область низких частот с помощью многочастотного смесителя и фильтра низких частот, а также огибающая H_1 функции корреляции фазоманипулированного сигнала $s_1(t)$ [10].

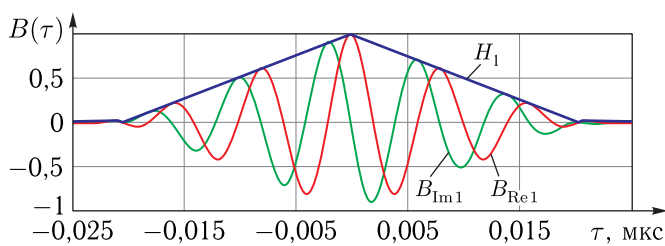


Рис. 3. Функция корреляции первого радиолокационного сигнала

Вещественная B_{Re1} и мнимая B_{Im1} составляющие представляют собой сдвинутые на $\pi/2$ копии, поэтому огибающая сигнала $s_1(t)$ имеет форму треугольника. При использовании двух фазоманипулированных сигналов с центральными частотами f_1 и f_2 , разнесенными на частотной оси

на величину Δf , когерентное сложение отсчетов разнодиапазонных сигналов позволит сформировать суммарный радиолокационный сигнал со средней частотой $f_{cp} = 0,5 \cdot (f_1 + f_2)$. Тогда для аддитивной смеси двух фазоманипулированных сигналов, разнесенных по частоте с коэффициентом широкополосности $\mu = \Delta f / f_{cp} = 0,3$, функция корреляции изменяется [11]. Комплексная функция корреляции аддитивной смеси двух фазоманипулированных сигналов, разнесенных по частоте, представлена на рис. 4.

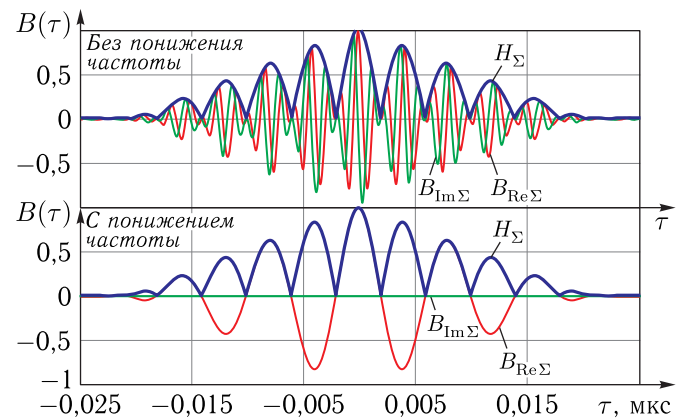


Рис. 4. Функция корреляции суммарного радиолокационного сигнала

На рис. 4 представлены вещественные $B_{Re\Sigma}$ и мнимые $B_{Im\Sigma}$ составляющие комплексной функции корреляции суммарного радиолокационного сигнала без понижения центральной частоты и при смещении энергетического спектра сигнала в область низких частот за счет применения многочастотного смесителя и фильтра низких частот. Видно, что огибающие H_Σ функции корреляции суммарного радиолокационного сигнала для случая понижения средней частоты и без понижения частоты идентичны. Из рис. 3 и 4 видно, что огибающие H_Σ и H_1 значительно отличаются. Так, для H_Σ характерно наличие основного пика и боковых лепестков с провалами до нулевого уровня. Видно, что при $\mu = 0,3$ интервал корреляции значительно уже и составляет $\Delta\tau_\Sigma = 0,005$ по сравнению с $\Delta\tau_1 = 0,05$.

При фиксировании средней частоты между двумя центральными частотами фазоманипулированных сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ и увеличении разноса

по частоте, т. е. при увеличении значения μ , зависимости интервалов корреляции $\Delta\tau$ от разнеса по частоте Δf двух сигналов для H_1 и H_Σ представлены на рис. 5.

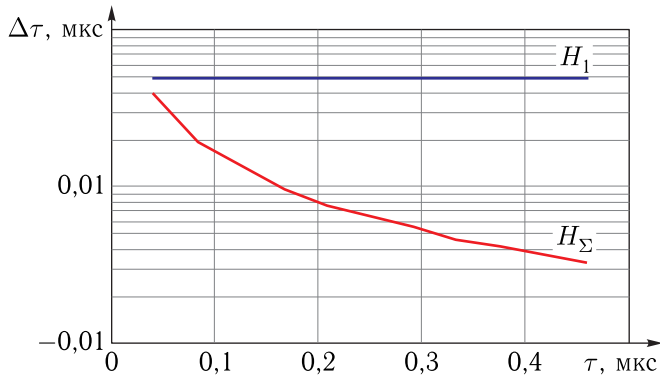


Рис. 5. Интервалы корреляции одного сигнала и аддитивной смеси двух фазоманипулированных сигналов, разнесенных по частоте

Из рис. 5 видно, что для случая, когда разнос частот двух РЛС составляет $\mu = 0,2$, интервал корреляции $\Delta\tau$ суммарного радиолокационного сигнала составляет $\Delta\tau_\Sigma = 0,008$ мкс, следовательно, в идеальных условиях потенциальная точность измерения дальности до цели в сети РЛС обзора пространства составит $0,5 \cdot 3 \cdot 10^8$ (м/с) $\cdot 8 \cdot 10^{-9}$ (с) = 1,2 м.

Результативность применения сети наземных радиолокационных станций обзора пространства при решении задач мониторинга космического пространства в условиях ретранслированных помех

Измерение дальности до цели осуществляется путем измерения времени запаздывания зондирующего сигнала. Наличие тепловых шумов приемника приводит к возникновению неточностей отслеживания времени прихода отраженного от цели сигнала, а следовательно, к ошибкам измерения в канале дальности. Величина таких ошибок зависит от многих факторов, и прежде всего от наличия помех в точке приема и месте их проявления в следящей системе. Уменьшение влияния

тепловых шумов и помех связано с четким согласованием характеристик системы с характеристиками радиолокационного сигнала и его отличием по структуре от внешних помех. Для определения величины ошибок используют передаточные функции системы по ошибке регулирования и по ошибке мешающего воздействия. Потенциальной ошибкой мешающего воздействия является флюктуирующая ошибка, вызванная наличием шума на входе измерительной системы. Шум искажает форму сигнала, из-за чего линия симметрии сигнала смещается относительно истинного положения. В результате отклик коррелятора отслеживается с ошибкой [12].

Потенциальная точность радиолокационных измерений параметров μ сигналов РЛС с огибающей произвольной формы [12] определяется по формуле

$$\sigma_\mu^2 = \frac{1}{(P_c/P_{ш})_{\text{вых}} \cdot (2\pi \cdot \mu_{\text{эк}})^2}, \quad (1)$$

где обобщенный параметр $\mu_{\text{эк}}$ может быть либо эквивалентной частотой огибающей сигнала $f_{\text{эк}}$ при оценивании дисперсии дальности, либо эквивалентной пространственной частотой при оценивании дисперсии угловых координат; $(P_c/P_{ш})_{\text{вых}}$ — отношение сигнал/шум по мощности на выходе коррелятора [12], которое определяется по формуле

$$(P_c/P_{ш})_{\text{вых}} = \frac{P_c G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2 \sigma_c \cdot K_{\text{сж}}}{(4\pi)^3 \cdot R_c \cdot k_B \cdot \Delta f_{\text{прм}} \cdot T}, \quad (2)$$

где P_c — мощность излучения зондирующего сигнала РЛС; $G_{\text{прд}}$, $G_{\text{прм}}$ — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн РЛС; λ — длина волны зондирующего сигнала; σ_c — эффективная площадь рассеяния цели; R_c — наклонная дальность от РЛС до цели; k_B — постоянная Больцмана; $\Delta f_{\text{прм}}$ — полоса пропускания приемника РЛС; T — шумовая температура приемника РЛС; $K_{\text{сж}}$ — коэффициент сжатия принятого сигнала при его корреляционной обработке в РЛС, причем при использовании фазоманипулированных сигналов $K_{\text{сж}} = T_{\text{длит}}/\tau_{\text{имп}}$, где $T_{\text{длит}}$ — длительность зондирующего сигнала; $\tau_{\text{имп}}$ — длительность элементарного импульса зондирующего сигнала.

При определении эффективной ширины спектра $f_{\text{эф}}$ целесообразно ее представлять как функцию

комплексного энергетического спектра [12] сигнала $S(f)$ на основе равенства Парсевалья

$$\int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df. \quad (3)$$

Тогда квадрат эффективной ширины спектра $f_{\text{эф}}^2$ через энергетический спектр сигнала $S(f)$ определяется по формуле [12]

$$f_{\text{эф}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} f^2 |S(f)|^2 df / \int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df. \quad (4)$$

При оценивании среднеквадратической ошибки измерения дальности σ_R^2 , зависящей от отношения сигнал/шум по мощности на выходе коррелятора и эффективной ширины спектра входного сигнала, можно использовать следующую формулу:

$$\sigma_R^2 = \frac{c_0}{2} \frac{1}{(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вых}} \cdot (2\pi \cdot f_{\text{эк}})^2}. \quad (5)$$

Не менее важной задачей РЛС обзора пространства является измерение угловых координат, которое основано на определении направления прихода электромагнитных волн, отраженных от цели. При этом полагается, что радиоволны распространяются вдоль прямой линии, соединяющей РЛС и цель. При оценивании в РЛС среднеквадратической ошибки измерения угловых координат необходимо учитывать форму диаграммы направленности приемной антенны и реализуемый метод сканирования. В зависимости от диаграммы направленности приемной антенны и метода сканирования пространства математические выражения для вычисления оценок дисперсии угловых координат отличаются. Так, для неподвижных антенных систем среднеквадратическая ошибка измерения угловых координат [12] определяется по формуле

$$\sigma_{\theta} = \frac{k_{\text{дн}} \theta_{0,5}}{(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вых}}}, \quad (6)$$

где $\theta_{0,5}$ — ширина диаграммы направленности приемной антенны РЛС по уровню половинной мощности в азимутальной (угломестной) плоскости.

При совместном применении двух РЛС обзора пространства и реализации алгоритмов комплексной обработки радиолокационной информации отношение сигнал/шум по мощности после корреляционной обработки $(P_{c\Sigma}/P_{\text{ш}\Sigma})_{\text{вых}}$ определяется исходя из следующих допущений [2, 3, 11–13]:

- формирование опорного сигнала в системе двух разнесенных РЛС осуществляется путем когерентного сложения отсчетов разнодиапазонных сигналов, поэтому мощность принятого суммарного сигнала будет определяться суммарной мощностей сигналов принятых в разнесенных точках приема, т. е. $P_{c\Sigma\text{вх}} = P_{c1\text{вх}} + P_{c2\text{вх}}$;

- мощность внутренних тепловых шумов при приеме суммарного сигнала определяется как $P_{\text{ш}\Sigma} = P_{\text{ш}1} + P_{\text{ш}2}$;

- после корреляционной обработки отношение сигнал/шум по мощности принятого суммарного радиолокационного сигнала определяется по следующей формуле:

$$(P_{c\Sigma}/P_{\text{ш}\Sigma})_{\text{вых}} = \frac{P_{c1\text{вх}} + P_{c2\text{вх}}}{P_{\text{ш}1} + P_{\text{ш}2}} \cdot K_{\text{сж}}, \quad (7)$$

где $K_{\text{сж}}$ — коэффициент сжатия сигнала, причем $K_{\text{сж}} = T_p \cdot \Delta f \cdot k_{\text{инт}}$, где $k_{\text{инт}} \in (0; 1]$ — коэффициент, учитывающий снижение результативности сжатия за счет интерференции сигналов. Для фазоманипулированных сигналов коэффициент сжатия $K_{\text{сж}}$ задается отношением длительности сигнала к длительности элементарного импульса, т. е. величина коэффициента сжатия фазоманипулированного сигнала равна длине псевдослучайной последовательности.

На основе оценок потенциальных точностей измерений координат в канале дальности σ_R и угловых каналах $(\sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta})$ формируются пространственные стробы $S_R = \chi \sigma_R$, $S_{\alpha} = \chi \sigma_{\alpha}$ и $S_{\beta} = \chi \sigma_{\beta}$ для поиска целей и завязки траектории их движения, где коэффициент пропорциональности χ задается исходя из того, что при $\chi = 3$ вероятность попадания отметки от цели в пространственный строб близка к единице [3, 13]. В пределах пространственного стога с достаточно высокой вероятностью должны быть получены отметки от цели на очередном цикле обзора РЛС. В то же время пространственный строб не должен быть излишне большим, чтобы исключить попадания

в него неограниченно большого количества ложных отметок. Размеры пространственного строга пропорциональны СКО радиолокационных измерений $(\sigma_R, \sigma_\alpha, \sigma_\beta)$, уменьшаются с ростом числа циклов обзора [12].

Для исследования результативности применения сети наземных РЛС обзора пространства при решении задач мониторинга космического пространства проведено имитационное моделирование радиолокационного наблюдения КО на фоне скопления мелкого космического мусора, приводящего к образованию многократных случайных переотражений радиолокационных сигналов. При поступлении в приемное устройство таких переотражений происходит формирование множества ложных отметок, которые в общем случае могут рассматриваться как ретранслированные помехи, обладающие высокой степенью сходства по структуре с зондирующими сигналами РЛС обзора пространства [3, 7].

В результате имитационного моделирования получены статистические зависимости селекции КО при реализации алгоритмов комплексной обработки радиолокационной информации на основе когерентного сложения отсчетов разнодиапазонных сигналов. Моделирование проводилось в рамках следующих допущений, обусловленных внутренними тепловыми шумами приемных устройств РЛС и ретранслированными помехами, обусловленными многократными случайными переотражениями зондирующих сигналов РЛС на трассе распространения. Во-первых, наличие внутренних тепловых шумов приемных устройств РЛС приводит к формированию случайных ошибок измерений в канале дальности и угловых каналах. В рамках одного цикла обзора РЛС они имеют нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и СКО измерений соответствующих $(\sigma_R, \sigma_\alpha, \sigma_\beta)$. Во-вторых, ложные отметки, обусловленные ретранслированными помехами, в пределах минимальной для двух РЛС разрешающей способности по дальности, распределены равномерно. В-третьих, оценивание вероятности селекции целей проводится для относительной дальности R/R_{\max} с началом отсчета в средней точке базы разноса между точками стояния разнесенных РЛС. Величина R_{\max} задается как максимальное удаление КО, одновременно наблюдаемого над общим для пары РЛС горизонтом

при прохождении подспутниковой трассы перпендикулярно базе разноса между РЛС [3, 4, 7, 8].

Оценивание результативности селекции целей радиолокационной системой обзора пространства на фоне ретранслированных помех проводилось путем реализации многократных статистических испытаний по формированию оценок координат целей и ложных отметок в заданных условиях радиолокационного наблюдения по показателю «вероятность селекции целей $P_{\text{сел}}$ » для двух случаев (рис. 6):

- попадание отметки от цели в рамках одного цикла обзора в пространственный строб одной РЛС (кривая 1) и пространственный строб системы двух РЛС (кривая 3);
- сброс завязки траектории цели по ложным отметкам, обусловленным ретранслированными помехами, по критерию « m из n » при наблюдении одной РЛС (кривая 2) и при наблюдении системой двух РЛС (кривая 4).

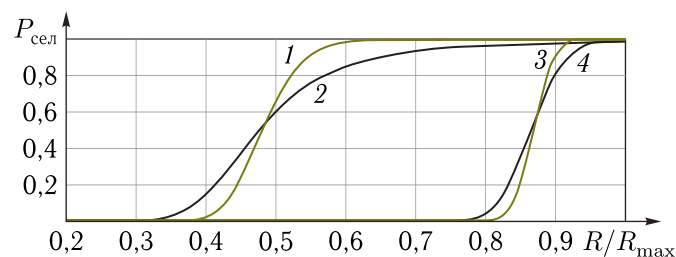


Рис. 6. Сброс с сопровождения ложных отметок, обусловленных ретранслированными помехами

Из рис. 6 видно, что реализация комплексной обработки радиолокационной информации в системе двух разнесенных РЛС на основе когерентного сложения отсчетов разнодиапазонных сигналов позволяет на большей относительной дальности R/R_{\max} решать задачу селекции целей на фоне ложных отметок, обусловленных ретранслированными помехами. Сброс с сопровождения ложных отметок однопозиционной РЛС при попадании отметки от цели в пространственный строб одной РЛС по показателю $P_{\text{сел}} = 0,8$ осуществляется на относительном удалении $R/R_{\max} = 0,52$ (кривая 1), а для системы двух РЛС — 0,89 (кривая 3). По показателю $P_{\text{сел}} = 0,8$ сброс завязки траектории цели по ложным отметкам, обусловленным ретранслированными помехами, по критерию « m из n » однопозиционной РЛС осуществля-

ется на относительной удалении $R/R_{\max} = 0,57$ (кривая 2), а для системы двух РЛС — 0,90 (кривая 4). При уменьшении разноса сигналов по несущей частоте (т. е. при уменьшении μ) происходит смещение относительной дальности селекции целей (кривые 3 и 4) влево по показателю $P_{\text{сел}} = 0,8$ как при моделировании попадания отметки от цели в пространственный строб, так и при моделировании сброса завязки траектории цели по критерию « m из n ».

Заключение

Мониторинг околоземного космического пространства является одной из приоритетных задач обеспечения безопасности полетов отечественных КА различного назначения. Применение наземных РЛС обзора пространства для наблюдения КО сопряжено с наличием ряда мешающих факторов, и в первую очередь с влиянием на приемные устройства РЛС внешних и внутренних помех. Для повышения достоверности формируемой радиолокационной информации и повышения точности проводимых радиолокационных измерений необходимо совершенствовать существующие алгоритмы обработки радиолокационной информации. На примере использования пары разнесенных РЛС обзора пространства показано, как на основе формирования единого опорного радиолокационного сигнала путем когерентного сложения отсчетов разнодиапазонных сигналов достигается эффекта повышения результативности селекции КО в условиях ретранслированных помех по сравнению с задействованием только одной наземной РЛС обзора пространства. Предложен подход к формированию единого опорного радиолокационного сигнала для двух разнодиапазонных РЛС обзора пространства и на основе результатов имитационного моделирования обосновано одновременное использование пары РЛС обзора пространства для решения задач мониторинга околоземного космического пространства.

Список литературы

1. Бабкин Ю.Н., Якубовский С.В. Возможность мониторинга высокоорбитальных космических объектов радиолокационными средствами дальнего обнаружения // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2017, т. 14, № 4-2. С. 28–33.
2. Левин Д.В., Мальцев Г.Н., Тришкин П.Н. Совместное применение разнесенных радиолокационных станций дальнего обнаружения в интересах решения задач контроля космического пространства // Научные технологии, 2023, т. 24, № 2. С. 48–54.
3. Левин Д.В., Паршуткин А.В., Тимошенко А.В. Достоверность селекции целей в сети разнесенных радиолокационных станций при совместной обработке радиолокационной информации в условиях ретранслированных помех // Информационно-управляющие системы, 2022, № 3. С. 55–66.
4. Коблов С.В., Макаров Ю.Н., Ступак Г.Г. Пути развития российской автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 2022, вып. 683. С. 232–237.
5. Боев С.Ф., Ступин Д.Д. Высокоинформативный мониторинг космического пространства — основа обеспечения ситуационной осведомленности в ближнем космосе // Вестник Академии военных наук, 2020, вып. 1(70). С. 111–118.
6. Пехтерев С.В., Макаренко С.И., Ковальский А.А. Описательная модель системы спутниковой связи StarLink // Системы управления, связи и безопасности, 2022, № 4. С. 190–255.
7. Кузнецов К.Е., Корягин М.Г. Повышение возможностей перспективных радиолокационных станций в условиях постановки многократных ответно-импульсных помех // Военная мысль, 2021, № 4. С. 93–100.
8. Голик А.М., Шишов Ю.А., Подгорный А.В., Санталов А.А. Совместное разрешение целей по дальности и угловым координатам радиолокационной станцией с цифровой антенной решеткой // Радиотехника, 2020, № 5(9). С. 16–27.
9. Журавлев А.В., Кирюшкин В.В., Коровин А.В., Савин Д.И. Синтез многопозиционных систем на базе сети специализированных излучателей // Успехи современной радиоэлектроники, 2022, т. 76, № 4. С. 47–55.
10. Антипенский Р.В., Ложкин К.Ю., Поддубный В.Н., Тюлин А.Е. Аналитические сигналы в статистической радиотехнике. М.: Радиотехника, 2016. 176 с.

11. *Астанин Л.Ю., Костылев А.А.* Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. М.: Радио и связь, 1989. 192 с.
12. *Дымова А.И., Альбац М.Е., Бонч-Бруевич А.М.* Радиотехнические системы. М.: Советское радио, 1975. 440 с.
13. *Ашурков И.С., Житков С.А., Захаров И.Н. и др.* Имитационная модель процесса обнаружения аэродинамических целей на основе параметрических преобразований в многопозиционной локационной системе // *Успехи современной радиоэлектроники*, 2022, т. 76, № 3. С.77–80.
14. *Мещеров Р.Р., Семашко А.В.* Моделирование корреляционных характеристик псевдослучайных последовательностей для различения сигналов / Сборник материалов XXVII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии ИСТ-2021», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. Н. Новгород, 2021. С. 222–225.

Дата поступления рукописи
в редакцию 12.05.2023

Дата принятия рукописи
в печать 29.05.2023