

## Модели сигналов и помех в многолучевом радиолокаторе при обнаружении беспилотных летательных аппаратов

© Авторы, 2017

© ООО «Издательство «Радиотехника», 2017

**И.К. Антонов** – к.т.н., директор по информационным технологиям компаний «Туроператор «Библио Глобус», «БГ «Оптикс», «БГ «Маркет»

E-mail: iantonov@complex-systems.biz

**М.Н. Жуков** – к.т.н., доцент, начальник отделения – гл. конструктор НТЦ АО «Заслон»

E-mail: amurskie@list.ru

Рассмотрены модели целей и ложных целей в многолучевой РЛС при обнаружении малоразмерных воздушных объектов. Показаны соотношения интенсивности сигналов целей и мешающих отражений от земли. Даны рекомендации по обоснованию требований к динамическому диапазону приемного тракта.

**Ключевые слова:** многолучевой радиолокатор, модели сигналов.

The models of goals and decoys in multibeam radar detection of small air targets. Showing the signal intensity ratio of goals and ground clutter. The recommendations on the justification of the requirements of the dynamic range of the reception path.

**Keywords:** multi-beam radar, signal model.

Одним из средств обнаружения и распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) при охране важных объектов от террористической деятельности являются многолучевые РЛС [1–4]. Они обладают возможностью длительно когерентно накапливать принимаемые сигналы, что обеспечивает высокие характеристики обнаружения на фоне внутреннего шума приемного тракта радиолокатора (шума) и эффективное подавление мешающих отражений от подстилающей поверхности (фона).

Определяющими при формировании облика многолучевого радиолокатора являются характеристики сигналов, отраженных от наиболее трудных для обнаружения и тактически интересных для охранной РЛС целей – малоразмерных БЛА. Радиолокационные характеристики таких целей и помех для их обнаружения при длительном когерентном накоплении сигнала слабо освещены в литературе и требуют дополнительных экспериментальных исследований.

Цель работы – предложить модели сигналов целей, характеристики сигналов ложных целей и методики расчета сигналов фона.

### Модели сигналов целей

В предлагаемых моделях рассматриваемые цели являются «точечными», так как их размеры значительно меньше пространственного разрешаемого элемента многолучевой РЛС. Важным приближением, но менее точным, чем предыдущее, является предположение о постоянстве параметров целей в течение времени когерентного накопления отраженного от нее сигнала. Считается, что в течение от 0,1 до 0,3 с цель не меняет скорости и направления движения, значение ее эффективной поверхности отражения (ЭПО) неизменно. Быстрые движения элементов цели (например, вращение винтов или махи крыльев птиц) и высокочастотные траекторные неустойчивости учитываются изменениями в спектре сигнала, но сам спектр полагается постоянным за время приема.

Зондирующий сигнал импульсно-доплеровского типа, используемый в охранных РЛС при обнаружении малоразмерных воздушных целей, показан на рис. 1. Для примера используется пачка импульсов длительностью  $T_c = 0,2$  с, излучаемых с периодом повторения  $T_n = 66,7$  мкс, что соответствует частоте повторения  $F_n = 1/T_n = 15$  кГц. Несущая частота сигнала  $f_0$  соответствует длине волны излучения  $\lambda = 10$  см.

На рис. 1 в позиции 2 показан центрированный относительно  $f_0$  участок спектра излучаемого сигнала, ширина главного лепестка спектра на уровне половины максимума составляет  $\Delta f = 1/T_c = 5$  Гц. Зондирующий ЛЧМ-импульс в пачке задан длительностью  $\tau_n = 1,5$  мкс с коэффициентом сжатия  $M_{сж} = 22,5$ , что обеспечивает потенциальную разрешающую способность РЛС по дальности

$\delta_R = c\tau_n / (2M_{сж}) = 10$  м. Ширина спектра зондирующего импульса на уровне половины максимума составляет  $\Delta_f = 1 / (M_{сж}\tau_n) = 15$  МГц.

На рис. 2 показан вид огибающей пачки сигнала, отраженного от неподвижной точечной цели (позиция 1), и от цели, движущейся с радиальной составляющей скорости  $V = 7$  м/с (позиция 2).

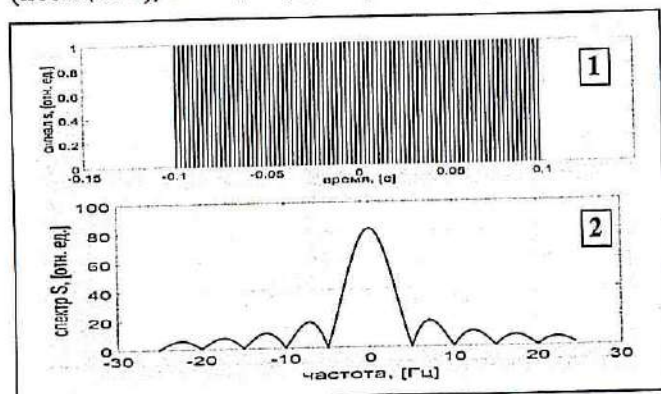


Рис. 1. Огибающая пачки немодулированных зондирующих импульсов: позиция 1 – форма пачки импульсов; позиция 2 – спектр пачки импульсов

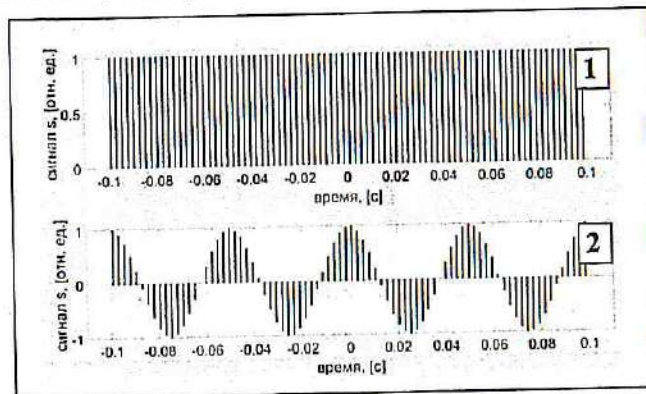


Рис. 2. Огибающая пачки сигнала, отраженного от точечной цели: позиция 1 – неподвижная цель; позиция 2 – движущаяся цель ( $V = 1$  м/с)

Эффективная поверхность отражения цели оказывает решающее влияние на характеристики ее обнаружения. Наиболее распространено определение ЭПО как среднего в некоторой области ракурсов наблюдения значения коэффициента отражения объекта. ЭПО зависит от формы и материала, из которого изготовлена цель, и изменяется от ракурса ее наблюдения. Особенно сильно отражают «необтекаемые» элементы конструкции, близкие по форме к уголковым отражателям. Большое влияние на отражение оказывает длина волны зондирующего сигнала – как правило, чем меньше  $\lambda$ , тем больше значение ЭПО. Однако и при облучении относительно длинными волнами, в диапазоне  $\lambda$  от 5 до 80 см, у малогабаритных целей, даже радиообтекаемой формы, может возникать резонансное отражение, существенно повышающее радиолокационную заметность.

Многообразие типов целей и широкий диапазон изменения ЭПО каждой цели в конкретных условиях наблюдения требуют использования понятия «расчетная ЭПО цели» – того ее значения  $\rho_{ц}$  для которого рассчитываются характеристики РЛС. Для радиолокаторов охранных комплексов, по опыту измерений ЭПО целей реальной аппаратурой, значения расчетной ЭПО  $\rho_{ц}$  для БЛА выбирают в диапазоне от 0,005 до 0,1 м<sup>2</sup>.

Спектральные характеристики отраженного от цели сигнала, особенно при его длительном когерентном накоплении, то есть при узкополосной фильтрации, оказывают влияние не только на характеристики обнаружения в свободном пространстве и на фоне помех, но и на возможности сигнального распознавания – определения типа цели и различения ее с ложными целями.

На рис. 3 приведены примеры спектров сигналов на выходе системы обработки РЛС для неподвижной и движущейся «идеальных» целей, то есть точечных, не имеющих высокочастотных флуктуаций корпуса и траектории. Шкала частот центрирована относительно  $f_0$ . Спектр точечной цели описывается функцией  $|S(f)| = S_1 |\text{sinc}(af)|$ , где  $S_1$  – амплитуда спектра, коэффициент  $a = \pi / \Delta_f$  определяет ширину спектра  $\Delta_f$ .

Сигнал движущейся цели имеет ту же амплитуду, что сигнал неподвижной цели, и сдвинут по частоте на  $f_d = 140$  Гц. Амплитуда спектра сигнала движущейся цели уменьшена, так как центральная частота спектра не совпадает с центральной частотой настройки фильтра. На практике несовпадение центральной частоты спектра цели с центральной частотой настройки фильтра приводит к колебаниям интенсивности изображения цели при незначительных изменениях скорости ее движения – «мерцанию» отметки цели.

Часто употребляемой характеристикой цели является время когерентности  $\tau_{ц} = 1 / \Delta_{фц}$ , ее определение поясняется на рис. 4. Энергичные быстрые колебания траектории или конструкции цели могут при-

водить к расширению и искажению формы спектра ее сигнала. В примере, показанном на рис. 4, спектр цели расширен до значения  $\Delta f_{ц} = 20$  Гц, что соответствует времени когерентности цели  $\tau_{ц} = 0,05$  с. При проектировании режима работы РЛС для обнаружения конкретного типа цели иногда целесообразно выбирать время когерентного накопления больше, чем время когерентности цели. В противном случае спектр цели будет «размазываться» по нескольким фильтрам, амплитуда сигнала в каждом из фильтров падает, следовательно, ухудшаются характеристики обнаружения.

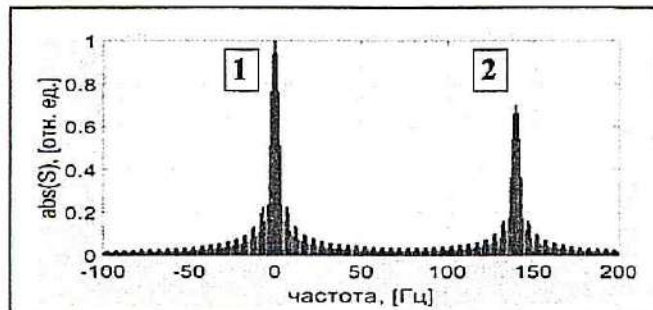


Рис. 3. Спектры сигналов, отраженных от точечной цели: позиция 1 – неподвижная цель; позиция 2 – движущаяся цель ( $V = 7$  м/с)

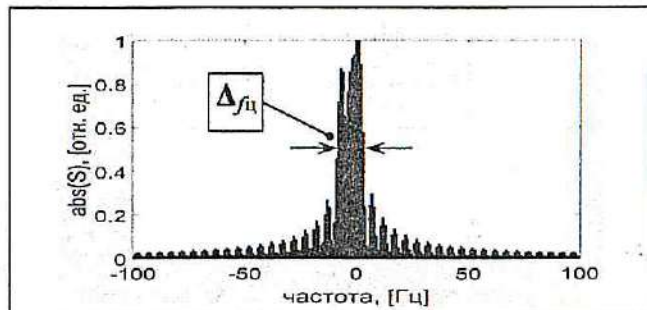


Рис. 4. Спектр сигнала, отраженного от флуктуирующей точечной цели

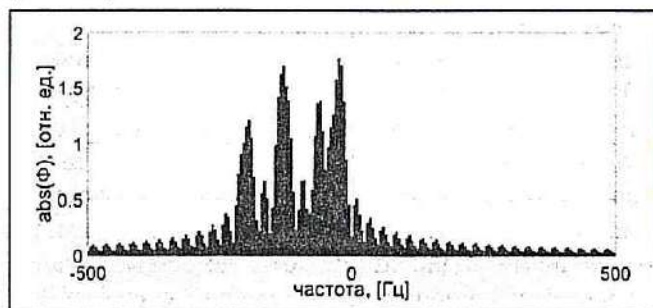


Рис. 5. Спектр сигнала цели при вращении ее винтов

В некоторых случаях деформация спектра сигнала цели за счет движения элементов ее конструкции может быть признаком для распознавания. Например, винты БЛА вызывают появление в спектре сигнала цели двух устойчивых составляющих, положение которых определяется скоростью вращения. Вариант такого спектра показан на рис. 5. Наблюдение этих устойчивых спектральных составляющих в процессе траекторного сопровождения цели позволяет идентифицировать ее как БЛА с пропеллерным двигателем.

### Модели сигналов ложных целей

Наиболее распространенными типами ложных целей для РЛС охранных комплексов являются метеорообразования (МО) и птицы.

Отражения от МО возникают на флуктуациях плотности среды распространения радиоволн. Они создают сигналы, идентичные отражениям от малоразмерной цели, и часто близкие к ним по интенсивности. МО не только создают помехи при обнаружении целей, но и несут полезную информацию о погоде. Количество ложных целей на экране РЛС, образованных отражениями от МО, возрастает при увеличении насыщенности атмосферы влагой или пылью, и может достигать десятков и сотен отметок в кадре. Средствами борьбы с ложными сигналами МО являются увеличение длины волны зондирующего сигнала  $\lambda$  и применение методов сигнального и траекторного распознавания.

Трудными для идентификации в качестве ложных отметок являются отражения от птиц, так как интенсивность их сигналов и вероятные скорости движения лежат в диапазоне возможных параметров отражений от малоразмерных БЛА. Большая часть доступных данных по радиолокационному наблюдению птиц относится к аэродромным РЛС с длиной волны излучения зондирующего сигнала 23 см и 10 см при невысоком частотном и пространственном разрешении радиолокатора, например [5,6]. Эти локаторы, как правило, некогерентные, и пролонгировать их данные на РЛС с длительным когерентным накоплением надо с осторожностью. По данным специалистов, аэродромные обзорные РЛС с длиной волны 10 см обеспечивают обнаружение стай птиц на расстоянии до 130 км, а с длиной волны 23 см – на расстоянии до 100 км. РЛС с длиной волны 3,2 см позволяют обнаруживать не только стаи, но даже мелких одиночных птиц размером с ласточку. Предельное расстояние обнаружения одиночных птиц среднего размера (грача, голубя, чайки) составляет у таких РЛС около 15 км.

Отраженные сигналы в большинстве случаев образованы не одной птицей, а несколькими, находящимися в объеме зондирующего импульса. Суммарная эффективная поверхность отражения от таких целей постоянно меняется. Сигналы, образованные одиночными птицами, флуктуируют в результате изменения положения тела птицы и маховых движений крыльев. Сигналы от птиц разнообразны, так как их вид зависит от целого ряда факторов – размеров и числа птиц, плотности стай, положения тела птиц по отношению к радиолокационному лучу. В связи с этим трудно дать единое и точное описание признаков, по которым может быть выполнено распознавание сигнала от птиц. Большие или малые стаи птиц, образованные крупными особями, дают сигналы, схожие по интенсивности с сигналами от небольших самолетов и вертолетов. Небольшие стаи дают сигналы, близкие по интенсивности к сигналам от малоразмерных БЛА.

Большинство птиц летит в любых возможных направлениях со скоростью, достигающей от 30 до 90 км/ч. При полете по ветру, особенно на высотах порядка от 0,5 до 3,5 км, скорость птиц может достигать 120 км/ч, а иногда и 150 км/ч. Птицы могут часто менять скорость, высоту и направление полета, перестраиваются в воздухе. При миграциях пролет птиц может идти настолько интенсивно, что экраны РЛС почти полностью покрываются их изображениями.

Далее приведены ориентировочные значения ЭПО птиц для десятисантиметрового диапазона излучения.

По экспериментальным данным ЭПО одной птицы  $\rho_{пт}$  составляет: ворона, грач, чайка, голубь – от 0,005 до 0,01 м<sup>2</sup>; аист – 0,03 м<sup>2</sup>.

Удельная ЭПО облака птиц  $\rho_{уд}$ , находящихся в разрешаемом объеме размером 10×10×10 м, зависит от плотности особей в стае. Ее оценочные значения составляют:

голубь  $\rho_{пт} = 0,005$  м<sup>2</sup>: две птицы в объеме –  $\rho_{уд} = 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>; 20 птиц в объеме –  $\rho_{уд} = 2 \times 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;

ворона  $\rho_{пт} = 0,01$  м<sup>2</sup>: две птицы в объеме –  $\rho_{уд} = 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>; 20 птиц в объеме –  $\rho_{уд} = 2 \times 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

Средний сдвиг доплеровской частоты отраженного от стаи сигнала определяется средней скоростью полета стаи и сдвигом стаи ветром. Так как при очень сильном ветре стаи, как правило, не летают, можно считать, что максимальная скорость стаи составляет  $V_{max} = 30$  м/с, что в десятисантиметровом диапазоне излучения соответствует максимальному сдвигу доплеровской частоты  $f_{max} = 600$  Гц. Спектр отраженного сигнала расширяется за счет движения крыльев и за счет разности скоростей полета птиц в стае. Характерные значения ширины спектра отраженного от стаи сигнала  $\Delta_{пт}$ , определяющиеся дисперсией скоростей птиц в стае и частотой махания крыльями, лежат в диапазоне от 10 до 500 Гц. Форма спектра зависит от поведения стаи. Различают два основных их типа – «дружная» и «базарная», с соответственно более узким и более широким спектром.

Наиболее эффективное распознавание птиц достигается при длительном траекторном сопровождении сигналов целей.

### Модели помех

Многолучевые РЛС подвержены воздействию пассивных помех, образованных отражениями от земной поверхности (фона). Интенсивность отражений от земной поверхности определяется пространственным распределением удельной ЭПО фона  $\rho_{ф}(x)$ , где  $x = \{x, y, z\}$  – вектор координат поверхности, а также формой и ориентацией диаграмм направленности (ДН) приемной и передающей антенн  $G_{прм}(x)$ ,  $G_{прд}(x)$ , где  $G$  – нормированное к своему максимуму значение коэффициента усиления антенны в данном направлении.

При оценке влияния фона на характеристики обнаружения задача состоит в оценке суммарной ЭПО всего участка поверхности, сигнал от которого проходит в стробируемый по дальности канал приемника; ширина этого участка составляет  $\Delta_R = \sigma_{тн} / 2$ . При формировании модели помехи для учета энергетических соотношений ЭПО отражающих элементов поверхности должны быть взвешены с уровнем направленных на них лепестков приемной и передающей ДН, и с дальностью до стробируемых участков поверхности.

На рис. 6 приведены геометрические соотношения для расчета параметров модели фона. Схематично показаны азимутальные сечения ДН. На рис. 7 приведены угломестные сечения ДН при обнаружении высоко летящей и низко летящей целей. Для высоко летящей цели отражения от земли принимаются по азимутальным боковым лепесткам ДН. Для низко летящей цели отражения от земли принимаются по главному лепестку ДН, их мощность гораздо выше, чем при обнаружении высоко летящей цели.

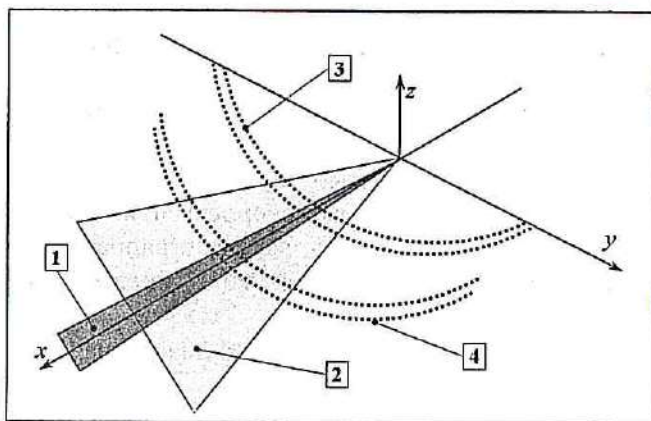


Рис. 6. Формирование помеховых отражений от поверхности земли в центральном луче приемной ДН (азимутальные сечения): позиция 1 – след одного из лучей приемной ДН; позиция 2 – след луча передающей ДН и ДН приемного элемента; позиция 3 – след канала дальности 1; позиция 4 – след канала дальности 2

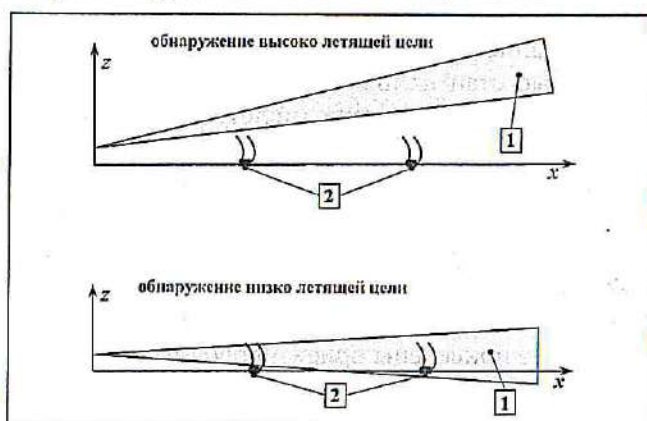


Рис. 7. Формирование помеховых отражений от поверхности земли в центральном луче приемной ДН (угломестные сечения): позиция 1 – лучи приемной и передающей ДН; позиция 2 – следы каналов дальности

Оценку соотношения интенсивности входных сигналов целей, фона и шума выполним для одного приемника, нагруженного на один приемный элемент антенной решетки. Передающая ДН освещает главным лучом одновременно всю зону обзора веера приемных лучей РЛС, в данном примере его ширина составляет  $60^\circ$ . Ширина ДН передатчика и приемного элемента совпадают. В канал дальности попадают сигналы, отраженные от участков поверхности, обозначенных на рис. 6 «след канала дальности» – позиция 3 и позиция 4. Показаны два таких участка, следующих с интервалом однозначного измерения дальности  $R_{одн}$ . Как правило, при расчетах достаточно ограничиться влиянием первых двух участков однозначности – вклад более дальних пренебрежимо мал.

Исходя из известной формулы дальности действия РЛС (например [7]), мощность сигнала, отраженного от фона, в канале дальности

$$P_s = \frac{PS_{прм}S_{прд}}{4\pi\lambda^2} \rho_{фз}, \quad (1)$$

где  $P$  – мощность излучения передатчика;  $S_{прм}$ ,  $S_{прд}$  – эффективные площади приемной и передающей антенн.

При учете двух отражающих в данный канал дальности полосок однозначности эффективная ЭПО фона рассчитывается по формуле

$$\rho_{фз} = R_1^{-4} \int_{\Omega_1} \Gamma_{прм}^2(\mathbf{x}) \Gamma_{прд}^2(\mathbf{x}) \rho_{ф}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} + R_2^{-4} \int_{\Omega_2} \Gamma_{прм}^2(\mathbf{x}) \Gamma_{прд}^2(\mathbf{x}) \rho_{ф}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \quad (2)$$

где  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  – области интегрирования по полоскам дальности;  $R_1$ ,  $R_2$  – расстояния до полосок дальности.

На графиках от рис. 8 и 9 показаны примеры расчета на имитационной модели значений сигналов целей, фоновых отражений и помех на входе приемника, нагруженного на один антенный элемент многолучевой ФАР. Значения сигналов даны в относительных единицах, масштаб по оси абсцисс переведен из задержки сигнала по времени в соответствующие значения дальности до отражающего объекта. Сигналы показаны на одном периоде излучения зондирующих импульсов, то есть на одном интервале однозначного измерения дальности. Удельная ЭПО фона принята постоянной на всей поверхности, независимо от угла ее облучения,  $\rho_{ф} = -20$  дБ. Боковые лепестки ДН не подавляются специальными алгоритмами, форма ДН описывается функцией  $\text{sinc}(\theta)$ . ЭПО цели принято  $\rho_{ц} = 0,1 \text{ м}^2$ , максимальное значение

сигнала  $U_{\max}$  рассчитывается по формуле дальности, за минимальное значение сигнала принимается  $U_{\min} = 0,1U_{\max}$ .

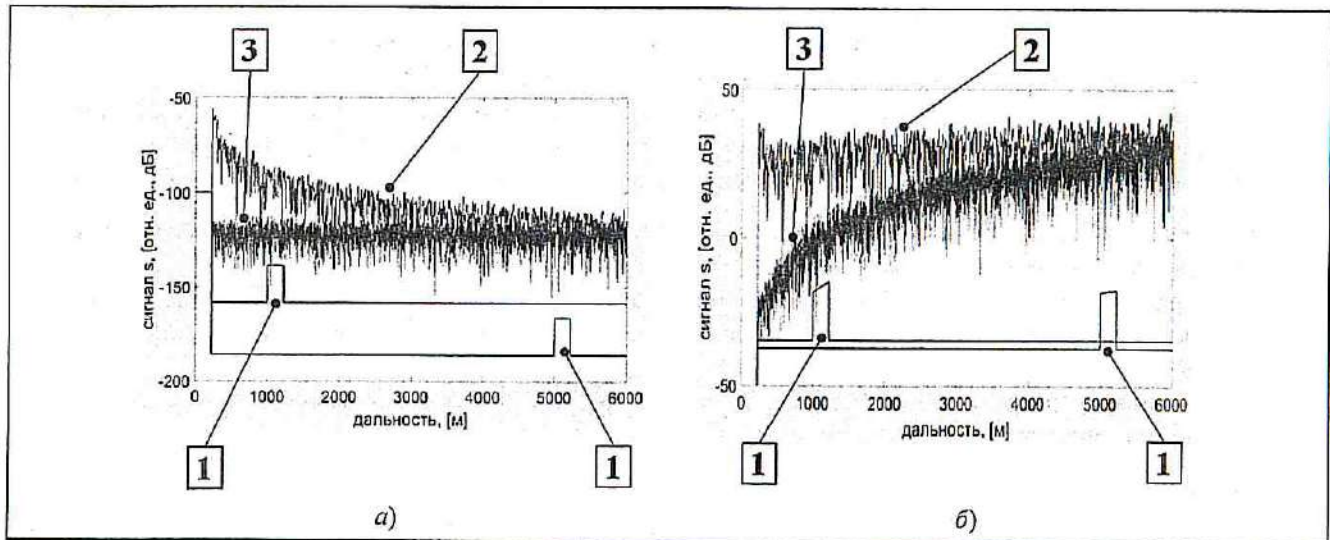


Рис. 8. Сигналы на входе приемного элемента ФАР до (а) и после (б) ВАРУ (низко летящая цель): позиция 1 – сигналы целей; позиция 2 – сигнал фона; позиция 3 – внутренний шум

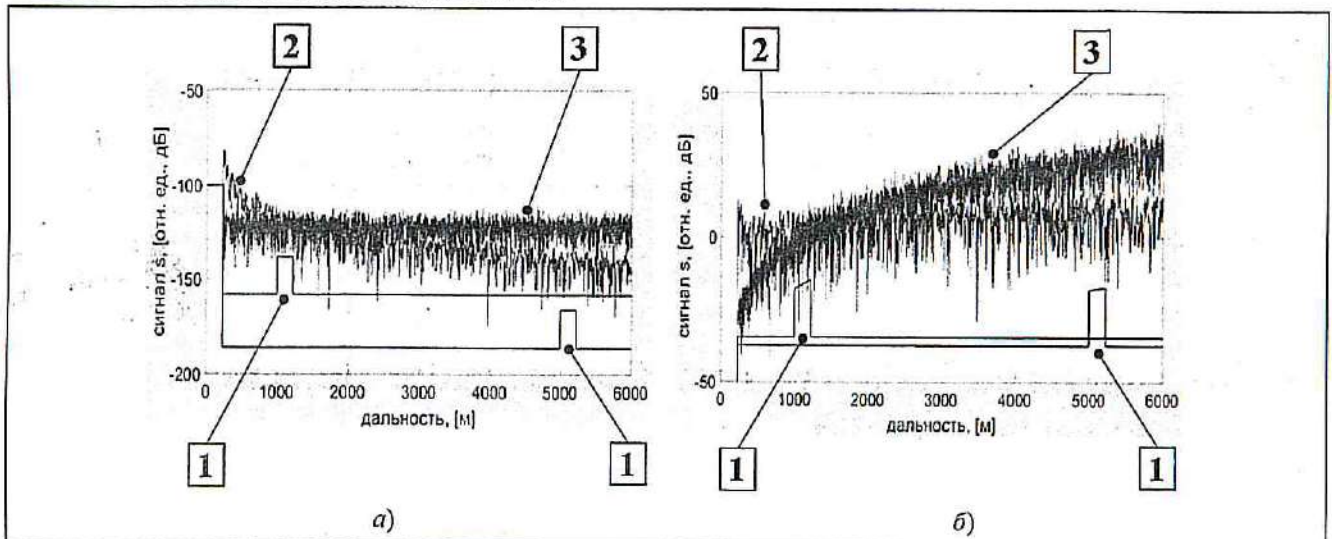


Рис. 9. Сигналы на входе приемного элемента ФАР до (а) и после (б) ВАРУ (высоко летящая цель): позиция 1 – сигналы целей; позиция 2 – сигнал фона; позиция 3 – внутренний шум

На рис. 8,а приведены соотношения входных сигналов при обнаружении низко летящей цели, когда луч ДН направлен параллельно горизонту. Входные сигналы целей значительно меньше по амплитуде, чем фон и внутренний шум.

Сжатие ЛЧМ-сигналов по дальности и длительное когерентное накопление позволяют обнаруживать их на фоне внутреннего шума, узкополосная доплеровская фильтрация отражений от фона обеспечивает его эффективное подавление. Процедуры сжатия и накопления сигнала, а также его фильтрации на фоне отражений от земли, требуют обеспечения линейности приемного тракта во всем диапазоне принимаемых сигналов и помех.

Для снижения требований к динамическому диапазону приемного тракта до его входа необходимо выполнять временную автоматическую регулировку усиления (ВАРУ). На рис. 8,б показан вид входных сигналов, когда алгоритм ВАРУ заключается в их умножении на коэффициент  $R^2$ , однозначно связанный с временем задержки  $R = ct_3 / 2$ :

$$u_{\text{вару}}(R) = R^2 u_{\text{вх}}(R). \quad (3)$$

Как видно из графиков на рис. 8,б, применение ВАРУ позволяет существенно сократить требуемый динамический диапазон приемного тракта.

В режиме обнаружения высоко летящей цели отражения от земли принимаются по угломестным боковым лепесткам диаграммы направленности. На рис. 9 показаны соотношения сигналов при уровне угломестных лепестков ДН, направленных на землю, составляющем  $-25$  дБ.

В рассматриваемом примере при применении ВАРУ требуемый динамический диапазон приемного тракта остается примерно таким же, как при обнаружении низко летящей цели, (сравни рис. 8,б и 9,б) – он определяется уровнем внутреннего шума приемника.

- Особенности РЛС, работающей в составе охранного комплекса и предназначенной для обнаружения малоразмерных воздушных целей типа БЛА, состоят в том, что:

отраженные от целей слабые сигналы наблюдаются на фоне значительно превышающих их по мощности отражений от земли, и для их приема необходимы приемники с широким динамическим диапазоном;

сигналы от целей и от ложных целей, например птиц, отличаются незначительно, что требует применения эффективных алгоритмов сигнального и траекторного распознавания

#### Литература

1. *Weiß M., Gilles M.* Initial ARTINO Radar Experiments // EUSAR 2010. Eurogress. Aachen. Germany.
2. *Klare J., Saalman O.* First Experimental Results with the Imaging Radar MIRA-CLE X // EUSAR 2010. Eurogress. Aachen. Germany.
3. *Антонов И.К.* Структура и базовые характеристики многолучевого радиолокатора охранного комплекса // М.: Радиотехника. 2017. № 4.
4. *Антонов И.К.* Потенциальные характеристики многолучевой РЛС в режиме обнаружения малоскоростных малозаметных целей // М.: Радиотехника. 2017. № 4.
5. *Ильичев В.Д.* и др. Техничко-экологическая стратегия защиты от биоповреждений // М.: Наука. 1995.
6. *Силаева О.Л.* и др. Защита самолетов и других объектов от птиц. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2007.
7. *Кондратенков Г.С., Лавров А.А.* и др. Авиационные системы радиовидения // М.: Радиотехника. 2015.

Поступила 10 апреля 2017 г.

## Models signals and clutter in multibeam radar detection unmanned aerial vehicles

© Authors, 2017

© Radlotekhnika, 2017

**I.K. Antonov** – Ph.D. (Eng.), Director for Information Technologies of the Companies «Tour operator «Biblio Globus», «BG «Optix», «BG «Market»

E-mail: iantonov@complex-systems.biz

**M.N. Zhukov** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of Department, Chief Designer STC of JSC «Zaslou»

E-mail: amurskle@list.ru

The article proposes target signal models, cover target signals characteristics and noise calculation method in order to explore multi-beam radars characteristics in the mode of small-size UAVs detection during critical site security service. These radars provide high detection characteristics on the internal receive path noise and effective ground scatter Interference blanking.

The article examines signals from targets with an effective reflection surface of  $0,005$  to  $0,1$  m<sup>2</sup> and cover targets such as moisture targets and birds. The calculation method of valid signal to ground scatter ratio is proposed, requirements to dynamic range of receive path are explored.

#### References

1. *Weiß M., Gilles M.* Initial ARTINO Radar Experiments // EUSAR 2010. Eurogress. Aachen. Germany.
2. *Klare J., Saalman O.* First Experimental Results with the Imaging Radar MIRA-CLE X // EUSAR 2010. Eurogress. Aachen. Germany.
3. *Antonov I.K.* Struktura i bazovye harakteristiki mnogolucheвого radiolokatora ohrannogo kompleksa // М.: Radiotekhnika. 2017. № 4.
4. *Antonov I.K.* Potencial'nye harakteristiki mnogoluchevoj RLS v rezhime obnaruzhenija maloskorostnyh malozametnyh celej // М.: Radiotekhnika. 2017. № 4.
5. *Il'ichev V.D.* i dr. Tehnico-jekologicheskaja strategija zashhity ot biopovrezhdenij // М.: Nauka. 1995.
6. *Silaeva O.L.* i dr. Zashhita samoletov i drugih ob#ektov ot ptic. М.: Tovarishhestvo nauchnyh izdaniy KMK. 2007.
7. *Kondratenkov G.S., Lavrov A.A.* i dr. Aviacionnye sistemy radiovidenija // М.: Radiotekhnika. 2015.