

АКТИВНЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

*Масленникова И.Л., Чистова Г.К.
Пензенский государственный университет
E-mail: penzgu.tmt.inbox.ru*

*Быстров Р.П., Обухов Ю.В. Соколов А.В.
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
E-mail: rudolf@cplire.ru*

Дается оценка результатов анализа применения активных радиолокационных систем обнаружения наземных объектов и их эффективность в терагерцовом и миллиметровом диапазонах волн.

Особенности использования радиоволн ТГц - диапазона в радиолокационных системах обнаружения наземных объектов, прежде всего, обуславливаются особенностями техники генерирования, излучения, приема и обработки радиолокационных сигналов этого диапазона радиоволн. При разработке РЛС обнаружения наземных объектов обосновываются их параметры: дальность действия, возможности обнаружения, точности пеленгования и сопровождения объектов, а также их скрытность и помехоустойчивость, которые в целом и определяют эффективность работы любой радиолокационной системы.

Для определения возможностей РЛС обнаружения наземных объектов, работающих в ТГц- диапазоне радиоволн воспользуемся исходными данными, имеющимися для длины волны 1,3 мм, как наиболее освоенной по сравнению с длинами волн 0,96 и 0,88 мм (с возможным прогнозом возможностей и для более коротких волн).

В качестве конкурирующих рабочих длин волн выберем 2,15 мм и 3,3 мм.

Энергетическая оценка проводилась по мощности передатчика, требуемой для обеспечения дальности действия РЛС в стандартной атмосфере (абсолютная влажность – 7,5 г/м³, давление 760 мм рт.ст., температура 293 К) и дожде средней интенсивности (~5 мм/ч). Указанная интенсивность дождя выбрана как неблагоприятный случай, когда вероятность появления таких дождей в течение года составляет 0,75–0,8. Мощность передатчика, $P_{пер}$, обеспечивающая заданную дальность действия, D_0 , определяется формулой радиолокации:

$$P_{пер} = \frac{4\pi P_{пр.мин} \lambda^2 D_0^4}{A_{эф} L \sigma_0} \times 10^{-0,2\gamma_a D_0}, \quad (1)$$

$P_{пр.мин}$ – чувствительность приемника; $A_{эф}$ – эффективная площадь антенны; L – коэффициент потерь в волноводном тракте и за счет неоптимальности обработки сигнала; σ_0 – ЭПР объекта; γ_a – коэффициент ослабления радиоволн в атмосфере.

Исходные данные для расчета принимались приведенные в табл. 1.

Для инженерной и достаточно быстрой оценки энергетического потенциала РЛС обнаружения наземных объектов разработана специальная модель [1,2].

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Параметры		Аэф = 0,6 м ² ; σ ₀ = 10 м ² ; L = – 10 дБ		
		Длина волны, мм		
		1,3	2,15	3,3
γ _а , Б/км	без дождя	2,5	1,0	0,3
	в дожде	4	3,5	3
P _{пр.мин} , Вт		8 · 10 ⁻¹¹	3 · 10 ⁻¹¹	1,3 · 10 ⁻¹¹

С этой целью формула радиолокации (1) была преобразована в логарифмическую форму в дБ через безразмерный параметр Π в следующем виде:

$$2 \int_0^D \gamma(D) dD + 40 \lg D + 71 = \Pi, \quad (2)$$

$$\Pi = \Pi_0 - 2q_{\text{сш}} - 2L - 2\lambda' + 2S'\alpha + \sigma', \quad (3)$$

где $\gamma(D)$ – коэффициент погонного ослабления излучения на трассе распространения, дБ/км; 71 и 40 – коэффициенты, полученные в результате логарифмирования уравнения; $\Pi_0 = P_{\text{пер}}/P_{\text{пр.мин}}$ – энергетический потенциал; $q_{\text{сш}}$ – отношение сигнал/шум на входе приемника; L – суммарные потери в СВЧ трактах; λ' – относительная длина волны к 1 мм; $S'\alpha$ – относительная эффективная площадь антенны к 1 м²; σ' – относительная ЭПР объекта к 1 м².

Зависимость $\gamma(D)$ – в общем виде является достаточно сложной, но с погрешностью в пределах 10–15% эту величину можно представить как усредненное значение коэффициента

$$\text{ослабления на трассе «РЛС – объект»} - \gamma_o \approx \frac{1}{D} \int_0^D \gamma(D) dD.$$

По формулам (2) и (3) произведен расчет дальности действия РЛС обнаружения на волнах 0,88; 1,3; 2 и 3 мм с учетом ослабления в дождях различной интенсивности, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Дальности действия радиолокационных систем

Длина волны, мм	Состояние объекта (типа автомобиль)	Метеоусловия			
		Ясное небо	Туман (плотность-0,1 г/м3)	Дождь (интенсивность - 5 мм/ч)	Дождь (интенсивность- 16 мм/ч)
3	в движении	10	8,5	5–6	2,5
2		7	6,5	4	1–1,5
1,3		2,5	2	1,2	0,6
0,88		1,4	1,2	0,7	0,2-0,3
3	неподвижное	5 – 6	5,5	3,5	1
2		4	3,5	2	0,5–0,7
1,3		1,2	1,0	0,7	0,3
0,88		0,6	0,4	0,25	0,1

В качестве заключения можно отметить, что можно рассчитывать на дальности действия РЛС обнаружения наземных объектов (типа автомобиль) при благоприятных метеоусловиях на длине волны 1,3 мм до 2500 м.- движущихся и 1200 м неподвижных и на длине волны 0,88 мм - до 1500 м – движущихся и до 500-600м - неподвижных. Поскольку данные получены расчетным путем, то для их подтверждения необходимы экспериментальные исследования.

Оценка характеристик обнаружения радиолокационного датчика. Наиболее информативной и удобной для сравнительного анализа характеристик обнаружения РЛС является зависимость вероятности правильного обнаружения объекта P_{no} от дальности действия станции, $P_{no} = f(D)$, при фиксированном значении вероятности ложной тревоги $F_{лт}$ за один цикл обзора, оценочная сущность которой сводится к определению отношения мощности полезного сигнала к мощности шума приемника $P_c / P_{*и}$ для РЛС, рабо-

тающих в свободном пространстве. Однако, при работе РЛС на вероятность правильного обнаружения влияет не только собственные шумы приемной системы, но туда также накладываются шумы в виде помех (мощности отражения) от земной поверхности и дождей. Суммарная мощность «шума» РЛС обнаружения в данном случае, согласно [3], определяется как

$$P_{ш}^{\Sigma} = \sqrt{P_{\phi}^2 + P_{\delta}^2 + P_{ш}^*} \quad (4)$$

где P_{ϕ} и P_{δ} – величина мощности отражений от фона (земной поверхности) и дождя соответственно.

В [3] была проведена оценка зависимости отношения $P_c / P_{ш}^{\Sigma}$ от дальности действия РЛС в условиях дождя средней интенсивности и без дождя. Результаты расчетов в виде графиков приведены на рис. 2. Здесь: сплошными линиями обозначены графики для условий без дождя и штриховыми – для дождя, а цифрами обозначены линии 1 для РЛД-1А, работающей на длине волны 0,88 мм, 2 – для РЛД-2А на длине волны 1,3 мм и 3 – для РЛД-3А на длине волны 2,15 мм.

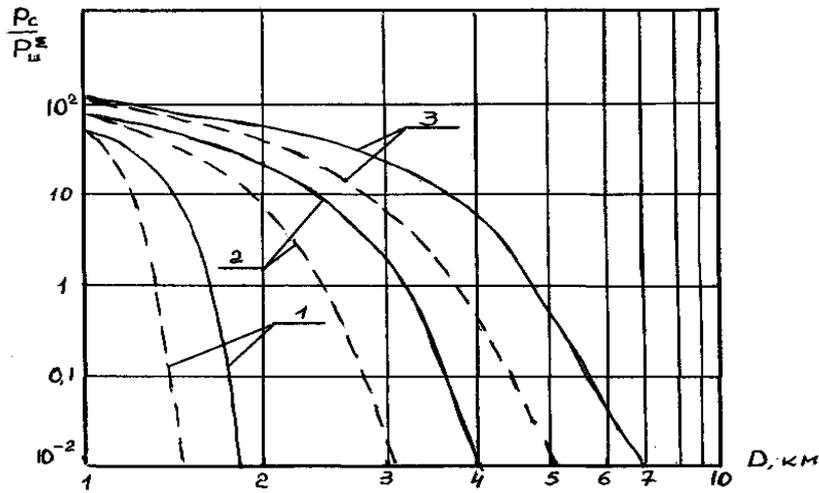


Рис. 2. Графики зависимости отношения мощности полезного сигнала к мощности суммарной помех от дальности

На рис. 3 для аналогичных погодных условий и для тех же трех видов РЛД -А приведены графики зависимости вероятности правильного обнаружения объекта от дальности его расположения, $P_{по} = f(D)$, при вероятности ложной тревоги $F_{лт} = 10^{-3}$ (число импульсов в пачке $Nn = 8$). Импульсная мощность и чувствительности приемных систем РЛД приравнивались к величинам, которые можно ожидать в перспективе. Апертуры антенных систем предполагались одинаковыми: параболоид с диаметром 600 мм.

Анализ полученных результатов показывает, что при одинаковых размерах антенн датчики, работающие в ТГц диапазон радиоволн обеспечивают более высокую вероятность правильного обнаружения объекта по сравнению с радиолокационными системами в более длинноволновом диапазоне (в любых погодных условиях). Это объясняется их более высокими разрешающими способностями по угловым координатам и соответственно меньшими интегральными величинами ЭПР фонов. Однако, достаточно быстрое снижение дальности таких РЛС объясняется большим затуханием радиоволн в атмосфере и тем более в дождях.

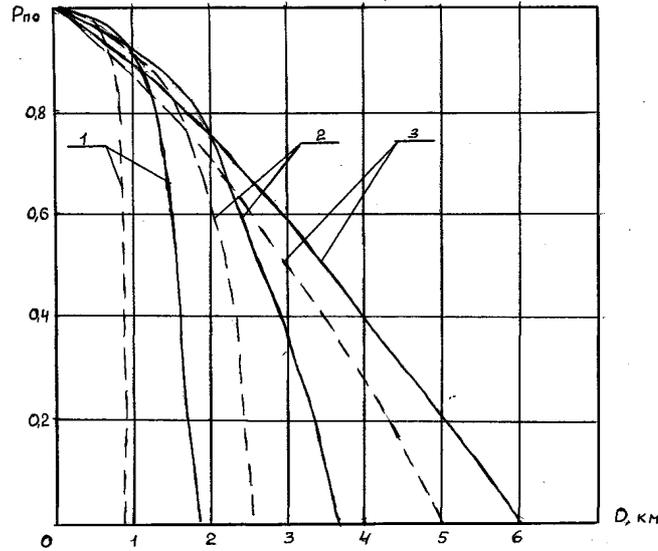


Рис. 3. Графики зависимости вероятности правильного обнаружения от дальности

Оценка помехозащищенности радиолокационной активной датчика. Помехозащищенность РЛС в общем случае определяется факторами, основными из которых являются скрытность работы, помехоустойчивость и возможности по постановке помех.

Как правило, для оценки помехоустойчивости РЛС обнаружения требуется сравнить уровни помех, которые могут быть созданы на различных участках СВЧ диапазона, при фиксированных внешних условиях и соблюдении необходимых для постановки помех требований. Наибольший уровень прицельных по направлению и частоте помех для РЛС могут создавать станции помех.

Поэтому оценка помехоустойчивости проводится по аналогии с диапазонами, в которых такие станции существуют.

Мощность помехи P_n на входе приемника РЛС определяется по известной формуле:

$$P_n = \frac{P_{nep}^{(n)} G_{nep}^{(n)} G_{np} \lambda^2 L^{(n)} L k \Delta f}{4\pi D_n^2} 10^{-0,1\gamma_a D_n} \quad (5)$$

где $P_{nep}^{(n)}$ – мощность передатчика помех; $G_{nep}^{(n)} \cdot G_{np}$ – коэффициенты усиления антенн станции помех и РЛС соответственно; $L^{(n)}, L$ – потери в трактах станции помех и РЛС; $k \Delta f$ – множитель потерь на расширение полосы, необходимой для определения частоты подавляемого сигнала.

Для оценки принято наиболее вероятное удаление передатчика помех от РЛС $D_n = 5000$ м, подавление осуществляется по боковым лепесткам прицельной по частоте и направлению помехой. Так как направление на РЛС определяется с ошибкой, то эта ошибка должна перекрываться ДНА передатчика помех. При достигнутой в настоящее время точности пеленгования и прицеливания считается, что коэффициент усиления антенны передатчика помех не должен превышать $G_{nep}^{(n)} = 2000$ [4]. Эта величина принимается одинаковой и постоянной для всех длин волн. Считается также, что средняя величина коэффициента усиления антенны по боковым лепесткам составляет 10 дБ по отношению к уровню излучения изотропной антенны. Примем запас на несовершенство антенны РЛС равным 3 дБ, тогда коэффициент усиления антенны РЛС в направлении боковых лепестков будет $G_{бок} = 0,2$, что соответствует 7 дБ.

Необходимая полоса частот прицельной помехи Δf_n должна составлять $\pm 0,05\%$ относительно несущей частоты подавляемой РЛС [4]. Полоса частот сигнала РЛС Δf_c определяется длительностью импульса τ_i по известному соотношению $\Delta f_c = 1/\tau_i$ и составляет около $0,02\%$ несущей частоты. Таким образом, потери на расширение необходимой полосы частот передатчика могут быть приняты одинаковыми для всех волн и равными

$$k\Delta f = \frac{\Delta f_c}{\Delta f_n} = \frac{0,02f_o}{0,1f_o} = 0,2 \approx -7\text{дБ}.$$

Принятые для расчетов значения мощностей передатчиков помех $G_{пер}^{(n)}$, коэффициентов ослабления радиоволн в атмосфере γa и потерь в трактах $L^{(n)}$ сведены в табл. 3.

Таблица 3

Данные для расчетов значения мощностей передатчиков помех

Параметры	Длина волны, мм			
	0,88	1,3	2,15	8
$P_{пер}^{(n)}$, Вт	0,5- 1	15	20	90
γa , дБ/км	5-7	3	1	0,06
$L^{(n)} = L$, дБ	15	12	10	7

Мощности передатчиков помех, принятые для расчетов, соответствуют имеющимся в настоящее время в основных диапазонах. Ожидаемая мощность помехи P_n в зависимости от длины волны, рассчитанная при перечисленных исходных данных по формуле (4), приведена на графике (см. рис. 5), где для сравнения приведены и уровни шума $P_{ш.пр}$ приемников РЛС. На этом же графике приведены значения мощностей передатчиков помех $P_{пер}^{(n)}$ в рассматриваемом диапазоне волн, принятые для расчета зависимости $P_n = f(\lambda)$, и требуемые мощности передатчиков $P_{тр}$, которые необходимы для создания на входе приемника такого же уровня помехи, как на волне 32 мм. Из графика видно, что ожидаемые уровни помех на входе приемников РЛС в короткой части ММ диапазона радиоволн существенно ниже мощностей собственных шумов приемников.

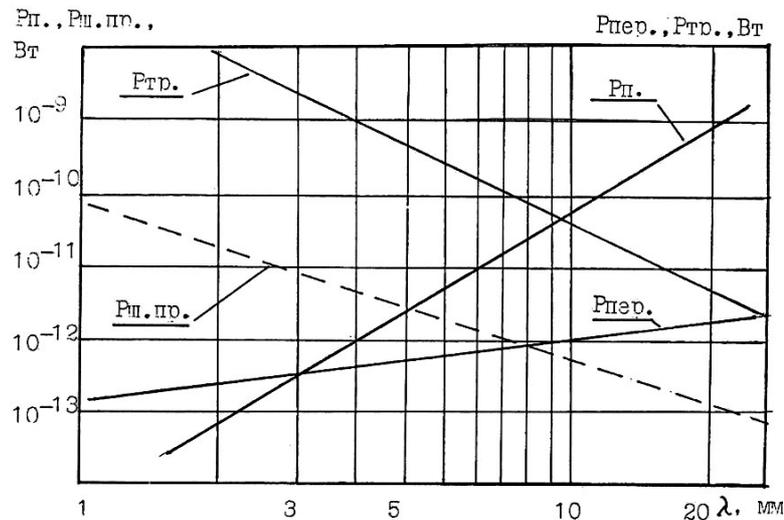


Рис. 5. Графики энергетических показателей РЛС

При работе РЛС в режиме секторного поиска коэффициент усиления ее антенны в направлении на передатчик помех будет изменяться в соответствии со структурой ДНА, характеризующейся областями основного и не основного направлений приема.

Область основного направления приема, соответствующая ширине главного лепестка ДНА на уровне 10 дБ, для РЛС составит не более 1–3% ширины сектора сканирования ДНА, что позволяет с погрешностью 3–7% исключить значение составляющей ширины ДНА из величины общего сектора сканирования.

Повышение скрытности РЛС достигается такими известными способами, как: снижением спектральной плотности потока мощности зондирующего сигнала, перестройкой частоты передатчика, запрограммированной работой передатчика с определенными паузами «замирания» и др. [4]. Последние два способа адекватны для РЛС на любой рабочей волне и поэтому здесь остановимся только на способе снижения спектральной плотности потока мощности.

Кроме того, целесообразно привести и другие основные технические пути, позволяющие повысить помехозащищенность РЛС ММ диапазона, а именно:

- для обеспечения помехоустойчивости РЛС в условиях воздействия интенсивных помех от подстилающей поверхности необходимо использование когерентно-импульсного метода радиолокации;

- для снижения радиояркости источника зондирующего сигнала необходимо использование широкополосных сигналов. При одновременном уменьшении мощности передающего устройства до единиц ватт за счет применения методов когерентной обработки принимаемых сигналов скрытность РЛС может быть повышена не менее чем на два порядка;

- для повышения помехозащищенности пеленгационных каналов РЛС обнаружения целесообразно использование моноимпульсного метода пеленгации.

Моделирование функционирования и оценка эффективности РЛС. При разработке методики обоснования параметров радиолокационных средств ТГц волн обнаружения (распознавания) наземных объектов, как и в других СВЧ диапазонах требуется, прежде всего, системный подход исследований, применение современного математического аппарата и вычислительной техники. Необходим также методический материал, разработанный на настоящее время, оценки функционирования и эффективности радиолокационных систем сантиметрового и дециметрового диапазонов, предназначенных для обнаружения (распознавания) движущихся и неподвижных наземных объектов. В процессе решения указанных сложных задач требуются такие исходные данные как качественные и количественные характеристики основных типовых радиолокационных систем, а также должны учитываться состояние и перспективы развития техники ТГц волн.

В основе создания требуемой математической модели, воспользуемся математическим методом, сущность которого согласно [5].

Предположим, что все исследуемые РЛД-А обнаружения применяются для обслуживания как групповых, так и одиночных объектов, которые находятся в зоне поиска.

Если объект групповой, то его состав может быть представлен как:

$$N = \sum_{i=1}^J N_i, \quad (6)$$

где N_i - число объектов i -го типа.

Каждый групповой объект i -го типа представляет собой совокупность n_i элементарных объектов

$$n_i = \sum_{k=1}^K n_{ik}, \quad (7)$$

где n_{ik} - число элементарных объектов k -го типа в составе i -го группового.

В тех случаях, когда не нужно увязывать задачу обнаружения с последующим воздействием на объект (например, наведением или управлением), то наиболее рациональным методом получения достаточно объективных оценок эффективности РЛД обнаружения одиночных и групповых объектов получен метод построения оптимальных моделей функционирования РЛД в типовых ситуациях, где приемлемы следующие частные критерии [6,7]:

$$W_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^I C_i M\{N_{cp}\}}{\sum_{i=1}^I C_i N_i} = \frac{\sum_{i=1}^I C_i N_i W_{cp,i}}{\sum_{i=1}^I C_i N_i}, \quad (8)$$

где W_o - вероятность обнаружения объекта; W_{cp} - вероятность обнаруженных объектов и определения его координат; $M\{N_o.i\}$ - математическое ожидание (МОЖ) числа обнаруженных объектов i -го типа из числа, находящихся в зоне наблюдения; C_i - весовой коэффициент, характеризующий важность объекта i -го типа.

В ходе проведенных исследований было установлено, что наиболее рациональным методом получения достаточно объективных оценок эффективности РЛД обнаружения наземных объектов является метод построения оптимальных моделей функционирования их в типовых ситуациях. В связи с этим в [6,7] были разработаны модели и алгоритмы функционирования, где оценка эффективности РЛД можно производить по формуле 7.

Необходимыми элементами такой модели являются блоки (куда входят управляемые и неуправляемые параметры, случайные воздействия и элементы ограничения): воспроизведения объектовой обстановки, условий наблюдаемости, случайных значений ЭПР объектов и блоки реализующие алгоритм поиска и обнаружения (при необходимости определения координат), вторичной обработки и анализа радиолокационной информации.

Алгоритм функционирования РЛС, включая формализованное описание процессов поиска и обнаружения объектов, а также вторичной обработки радиолокационной информации достаточно полно нами обоснован в [6] и реализован в программах. Однако для случая, когда РЛС обнаружения предназначается для выполнения дополнительной задачи как воздействие на объект (наведения или управления движением), классический алгоритм воздействия по движущимся групповым и одиночным объектам меняется. С этой целью была разработана упрощенная блок-схема варианта математической модели, представленная на рис. 6.

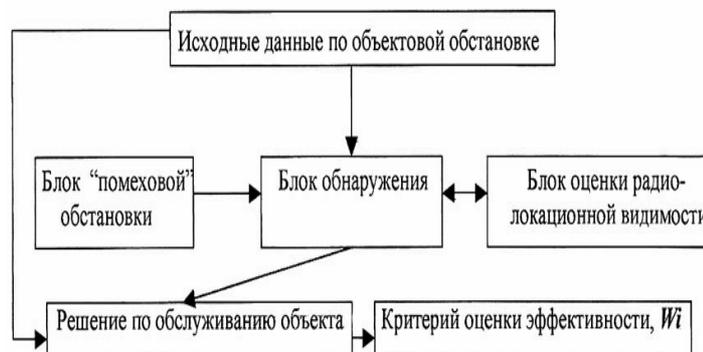


Рис. 6. Варианта математической модели оценки эффективности РЛС сектора обзора.

Разработанная математическая модель позволяет провести оценку эффективности РЛС при выполнении требуемых задач контроля в секторе обзора по критерию обнаружения объекта W_o . Такая модель позволяет воспроизводить в динамике объектовую обстановку для типовых случаев функционирования объектов на территории охраны.

Для оценки эффективности РЛС обнаружения и определения координат наземных объектов в определенном секторе поиска и сопровождения, воспользуемся специально разработанной моделью, представленной в [1].

В качестве критерия (см. формула 7) - относительное количество своевременно обнаруженных объектов с определением их координат $W_{ср}$.

Для наглядности оценка эффективности на примере РЛД -2А проводилась в сравнении с РЛС, которая в настоящее время применяется для обнаружения наземных объектов. Такая станция СБР-3 (станция ближней разведки) способна обнаруживать на дальностях до 4,5 км движущегося автомобиля и до 1,5 км одиночную фигуру (человека) и имеет следующие характеристики: рабочая длина волны 3 см, импульсная мощность 40 мВт, разрешение по дальности до 40 м и ~ 15 угл. мин., полоса пропускания 100 МГц.

В качестве исходных по характеру местности выбираем наиболее распространенные участки местности холмистый и равнинный, и по объектовой обстановке примем, что все объекты в секторе наблюдения располагаются равномерно и могут быть движущимися и неподвижными, одиночные и групповые.

В результате обработки реализаций процесса функционирования РЛД обнаружения были построены зависимости относительного количества обнаруженных объектов с определением координат – $W_{ср}$ в зависимости от дальности действия станций. Такие зависимости в виде графиков функции $W_{ср} = f(D)$ представлены на рис. 7, где под номером 1 приведены кривые для РЛД-2А, а под номером 2 – для РЛС СБР-3. Здесь же сплошные линии для условия равнинной местности и с крестиками для холмистой местности

Анализ результатов оценки функциональной зависимости $W_{ср} = f(D)$ показали, что их полученные расчетные кривые практически совпадают с кривыми функции $W_0 = f(D)$, но значения относительного количества обнаруженных объектов с определением координат примерно на 10-15% ниже. Это объясняется тем, что для точного определения координат объектов требуется более длительное накопление отраженного сигнала и требуется дополнительное время на его обработку.

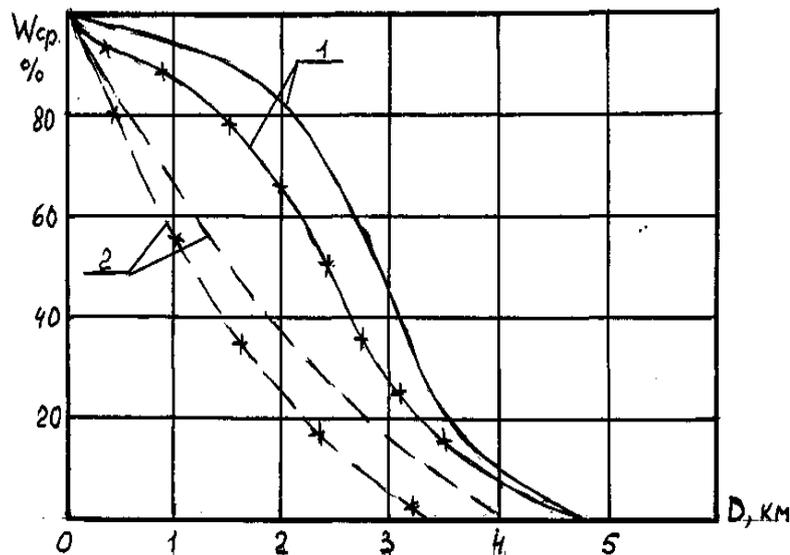


Рис. 7. Зависимости функции $W_{ср} = f(D)$

Анализируя графики рис. 7, можно видеть, что использование РЛД -2А повышает вероятность обнаружения наземных объектов в сравнении с РЛС типа СБР (сантиметрового диапазона волн) дальностях до 3-х км от 20 до 40%. Однако, необходимо заметить,

что поисковые характеристики РЛС типа СБР в сравнении с РЛД отличаются в лучшую сторону.

Литература

1. Быстров Р.П., Потапов А.А., Соколов А.В., Федорова Л.В., Чеканов Р.Н. Проблемы распространения и применения миллиметровых волн в радиолокации. – Зарубежная радиоэлектроника, № 1, 1997, с. 4-20.
2. Быстров Р.П. Радиолокационные системы обнаружения наземных объектов в коротковолновой части миллиметрового диапазона радиоволн. В 2-х томах. Т.1. – М.: Изд-во «Технология», 2002. – 216 с.
3. Мандросов В.И., Бакут П.А., Матвеев И.Н., Устинов Н.Д. Теория когерентных изображений. М., Радио и связь, 1987.
4. Башаринов А.Е., Гуревич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. – М.: Наука, 1974.
5. Промежуточный отчет по НИР «Шаль», 2008.
6. J. Preissner, Z. Flugwiss Weltraumforsch. 1981, Heft 6, s. 403.
7. Button K.J. ,Wiltse J.C. Infrared and Millimeter Wavse, v. 4, Millimeter Systems Acad. Press. N.Y. London, Toronto,1981.