

УДК 621.396.962.25

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА РЛС НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТРОВЫХ ВОЛН

И. В. Васильев, к.ф.-м.н., директор департамента, Специальное конструкторско-технологическое бюро «Гранит», Алматы, Республика Казахстан;

orcid.org/ 0000-0002-6216-0443, e-mail: iv@granit.kz

С. М. Салий, к.в.н., ассоциированный профессор (доцент), начальник научного управления Пограничной академии КНБ Республики Казахстан, Алматы, Республика Казахстан;

orcid.jrg/ 0000-0003-3590-8062, e-mail: salii70@mail.ru

Д. Б. Съедин, к.в.н., ассоциированный профессор (доцент), заместитель начальника факультета по научной работе Пограничной академии КНБ Республики Казахстан, Алматы, Республика Казахстан; e-mail: anna4seredina8@gmail.com

В работе рассматриваются особенности расчёта дальности обнаружения морских целей РЛС непрерывного излучения метрового диапазона волн. Приведена информация о перспективах использования метрового диапазона волн для дальнего обнаружения малоразмерных целей, таких как небольшие катера и беспилотные летательные аппараты, делающие актуальной разработку недорогих мобильных радиолокаторов с ЛЧМ сигналами. Показаны ограничения тактико-технических характеристик радиолокаторов, связанные со стабильностью задающих генераторов, доплеровской скоростью и длительностью интервалов когерентного накопления. Сделана оценка величины потерь энергетического потенциала РЛС при использовании задающих генераторов со стабильностью частоты, недостаточной для осуществления когерентного накопления на длительных интервалах до 10 секунд. Приведён пример расчёта энергетического потенциала для обнаружения катера на дистанции 11 км для РЛС, проектируемой на базе систем, используемых в радиолокаторе П-18М, производимом в Республике Казахстан.

Ключевые слова: БПЛА, БПФ, когерентность, ЛЧМ, морская цель, накопление, радиолокация, разрешающая способность, РЛС, стабильность частоты, ЭПР.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-83-13-21

Введение

Радиолокационное обнаружение надводных целей, как правило, ограничивается дистанциями в пределах радиогоризонта. Обычно для этих целей используются импульсные радиолокаторы сантиметрового диапазона волн, которым свойствен ряд недостатков, ограничивающих их возможности. К таким недостаткам относятся, например, большие помехи от волн и от прибрежной растительности (камышей). Для преодоления этих проблем необходимы иные технические решения, одним из которых может быть использование радиолокаторов метрового диапазона. В 2005 году в Ливорно (Италия), при испытаниях венгерского варианта модернизации РЛС метрового диапазона волн П-18, были зарегистрированы легкомоторные воздушные и надводные цели. А в 2015 году в средствах массовой информации было сообщено [1] о том, что ВМС Украины стали использовать РЛС П-180 «Малахит» метрового диапазона волн для охраны морских границ. В работе [2] были представлены результаты по обнаружению морских целей радиолокатором метрового диапазона П-18М на дистанциях до 70 км. Правда, при этом РЛС была установлена на высоком восточном берегу Каспийского моря. При этом и РЛС П-180, и РЛС П-18М являются импульсными радиолокаторами.

Другим техническим решением проблем обнаружения морских целей является использование длительного когерентного накопления радиолокационных сигналов, так как скорости морских целей и их манёвренность существенно ниже, чем у воздушных целей. В работе [3] описан пример обнаружения малой надводной цели на дальностях, в 1,5 раза превышающих

дальность радиогоризонта. В этой же работе была сделана оценка уровня среднеквадратичной флуктуации радиальной скорости объектов на периодах наблюдений до 10 секунд как незначительная.

Реализация столь длительного накопления в импульсных радиолокаторах невозможна, так как у них, как правило, очень высокая скважность излучения, тем более если эти радиолокаторы кругового обзора. В этих условиях привлекательными становятся секторные радиолокаторы непрерывного излучения (FMCW) с неподвижными антенными системами метрового диапазона волн.

Такие локаторы давно используются для обнаружения малоразмерных целей, например в системе предупреждения о ракетном нападении (СПРН) [4] ПРО такие, как «Дунай», «Днепр», «Дарьял». Эти локаторы способны обнаруживать цели размером от 15 до 40 см на дальностях в тысячи километров, однако для обнаружения таких целей локаторам необходима их «прямая видимость». Перспективны подобные РЛС и для обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов, летающих с небольшими скоростями [5].

Данные об успешном обнаружении малогабаритных морских целей, в том числе загоризонтных, были получены при использовании переделанной для научных нужд импульсной РЛС П-18 [6]. Чувствительность приёмного устройства в когерентном режиме составляла -180 дБ/Вт (у серийной РЛС $P_{пр_мин} = -143$ дБ/Вт) при накоплении 4096 импульсов длительностью 5 мкс, при полосе фильтра основной селекции 300 кГц. Мощность передающего устройства составляла 180 кВт, а коэффициент усиления приёмопередающих антенн – 250. При частоте посылок зондирующих импульсов в 400 Гц время локации составляло около 10 секунд, хотя в реальности цель облучалась всего $4096 \cdot 5 \text{ мкс} \approx 20 \text{ мс}$. Из этого можно сделать вывод, что применение локаторов непрерывного излучения, у которых когерентное накопление может осуществляться в течение всего периода зондирования, может существенно снизить требования к выходной мощности локатора и коэффициенту усиления антенных систем для получения аналогичных параметров обнаружения.

Однако для обеспечения когерентности на столь значительных интервалах времени требуется очень высокая стабильность частоты задающего генератора. Так как задающий генератор аналогового радиолокатора П-18 не мог обеспечить сколь-нибудь приемлемой стабильности частоты, то для обеспечения когерентности в макете когерентного локатора использовался высокостабильный опорный генератор на основе рубидиевого стандарта частоты. В реальных радиолокаторах не всегда имеется возможность использования сверхстабильных генераторов, что приводит к ограничению максимально возможного времени когерентного накопления сигналов. В работе [7] приводится зависимость потерь энергии сигнала (при когерентном накоплении) в зависимости от неидеального фазирования длительного сигнала. Из приведённого в этой работе графика следует, что потеря энергии сигнала в 1 дБ происходит при набеге фазы в 70 градусов на интервале накопления. Оценим необходимую относительную стабильность опорного генератора в описанном случае, для обеспечения когерентного накопления на интервале 10 секунд при рабочей частоте РЛС 150 МГц и допустимых потерях накопления 1 дБ.

$$\delta_f = \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t}{t_n} = \frac{(\Delta \lambda / c)}{t_n} = \frac{(\lambda \cdot \Delta \varphi_{\text{дон}} / 360^\circ)}{c \cdot t_n} = \frac{c \cdot \Delta \varphi_{\text{дон}}}{c \cdot t_n \cdot f \cdot 360^\circ} = \frac{70}{10 \cdot 150 \cdot 10^6 \cdot 360} = 1,3 \cdot 10^{-10}, \quad (1)$$

где t_n – время накопления; Δt – ошибка измерения времени на интервале накопления; λ – длина волны РЛС; f – рабочая частота РЛС; c – скорость света; $\Delta \varphi_{\text{дон}}$ – допустимый «набег» фазы.

Для справки, рубидиевый стандарт частоты ЧЗ-84А, например, обеспечивает систематический дрейф частоты за один месяц $\pm 10^{-11}$ [8], а малогабаритный опорный рубидиевый Р400/1 $\pm 5 \cdot 10^{-11}$ [9]. Уравнение (1) позволяет оценить максимально допустимое время когерентного накопления $t_{нк}$ РЛС на частоте 150 МГц, при использовании кварцевого опорного генератора:

– для $\delta_f = 10^{-6}$ $t_{нк} = 1,3$ мс (кварцевый генератор без термостабилизации);

– для $\delta_f = 5 \cdot 10^{-9} t_{нк} = 260$ мс (генератор с термостабилизацией, используемый в РЛС П-18М).

Из этого следует, что если стабильность опорного генератора не позволяет обеспечить максимально возможного времени когерентного накопления t_n , то для получения максимально достижимого энергетического потенциала необходимо использовать некогерентное накопление результатов когерентного накопления, что дополнительно позволит увеличить соотношение сигнал/(шум+помеха) на выходе накопителя в $N_{нн}$ раз:

$$N_{нн} = \sqrt{\frac{t_n}{t_{нк}}} \quad (2)$$

Другим важным фактором является различие в порядке расчёта полосы фильтра основной селекции у импульсных РЛС и РЛС непрерывного излучения. В импульсных РЛС полоса фильтра основной селекции определяется длительностью импульса, а РЛС FMCW – заданным разрешением РЛС по дальности обнаружения и скоростью изменения частоты. Принцип работы локаторов FMCW иллюстрируется рисунком 1.

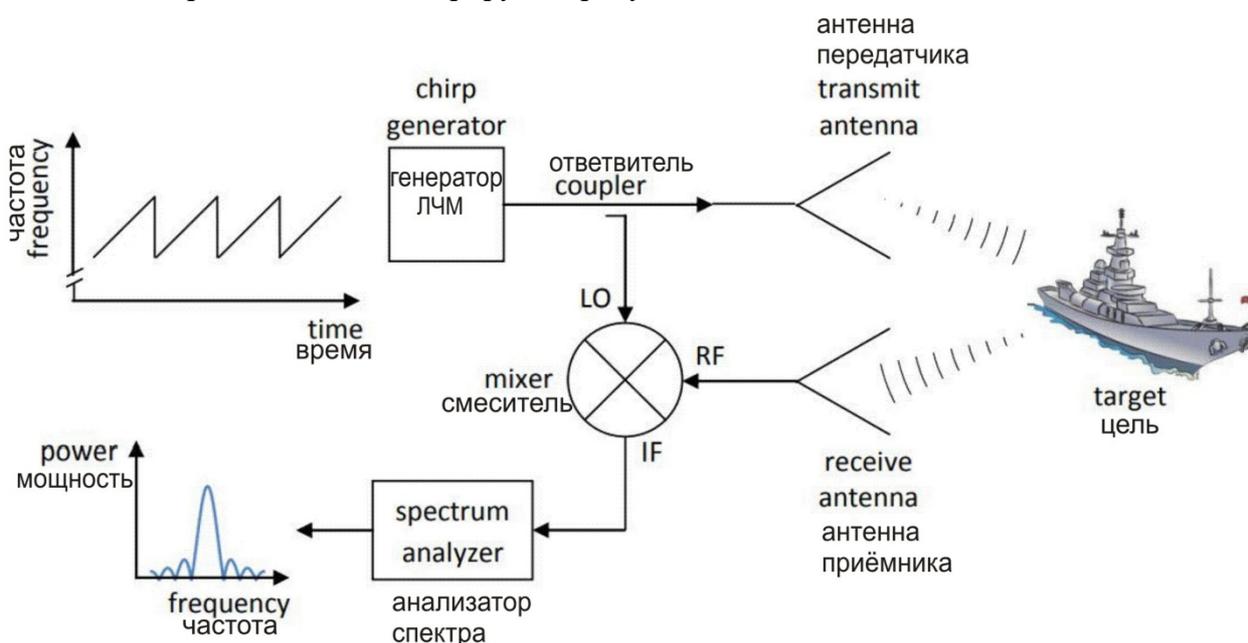


Рисунок 1 – Принцип работы локатора непрерывного излучения [10]

Figure 1 – Principle of continuous radiation locator operation [10]

Как следует из рисунка 1, передающее устройство радиолокатора генерирует непрерывный сигнал с изменяющейся во времени частотой. Скорость изменения частоты $b = df / dt$. Пока радиосигнал достигнет цели и вернётся обратно, частота генерируемого передатчиком сигнала уже изменится и после смешивания отражённого от цели сигнала с сигналом передающего устройства выделяется разностная частота, пропорциональная времени, необходимому для радиосигнала, чтобы пройти путь до цели и обратно.

$$\Delta F_{\max} = \frac{2R_{\max}}{c} b, \quad (3)$$

где R_{\max} – максимальное расстояние до цели (инструментальная дальность).

Из (3) следует, что, снижая скорость изменения частоты, можно пропорционально снижать мощность шума приёмного устройства и, соответственно, увеличивать соотношение сигнал/шум, то есть повысить энергетический потенциал радиолокатора. Однако на практике это учитывается далеко не всегда. Например, в работе [11] приводятся результаты двух экспериментов по обнаружению малых БПЛА одним и тем же прототипом радара FMCW, но с разной скоростью сканирования. Использовался приёмопередатчик, который работал в диапазоне 14 ГГц с мощностью 20 дБмВт и антеннами с усилением 16 дБн.

В эксперименте «А» период зондирования составлял 860 мкс, а в эксперименте «В» период был 300 мкс. За это время частота изменялась на 150 МГц. Значит, в первом случае скорость изменения частоты была 174 МГц/мс, а во втором – 500 МГц/мс. Казалось бы, можно было ожидать увеличения дальности обнаружения цели в первом эксперименте почти в 3 раза, однако в эксперименте «А» была достигнута дальность обнаружения 1075 метров, а в эксперименте «В» всего 75 метров при практически одинаковой разрешающей способности по дальности. Разница в дальности обнаружения составила не 2,8, а 14,3 раза. Всё дело в том, что в первом эксперименте для обнаружения использовалось 2048 отсчётов аналого-цифрового преобразователя, а во втором только 128 отсчётов. Это давало возможность накопления в 16 раз больше энергии сигнала, а энергия шума распределялась по большему числу дискретов частоты при быстром преобразовании Фурье (БПФ), так как при БПФ должен выполняться закон сохранения энергии.

$$\int_0^{T_m} \kappa_u k T \Delta F dt = \int_0^{\Delta F} \kappa_u k T T_m df, \quad (4)$$

где T_m – время измерения.

В упомянутой работе не даётся разъяснений относительно влияния этих факторов на энергетический потенциал локатора, а при проведении энергетических расчётов их необходимо учитывать.

Продемонстрируем порядок расчёта энергетических характеристик радиолокатора, создаваемого в рамках проекта программно-целевого финансирования, предназначенного для обнаружения малоразмерных надводных целей в пределах радиогоризонта. Радиолокатор проектируется в соответствии с техническим решением, защищённым патентом [12]. В соответствии с этим патентом РЛС должна быть секторного обзора пространства, содержащая одну передающую и две приёмные антенны, установленные в один ряд. Большинство систем создаваемого радиолокатора проектируется на базе аналогичных систем РЛС П-18М, в том числе и опорный генератор, позволяющий, как было показано выше, обеспечить время когерентного накопления 260 мс, которое должно соответствовать одному периоду зондирования T .

На рисунке 2 показан временной цикл работы локатора непрерывного излучения.

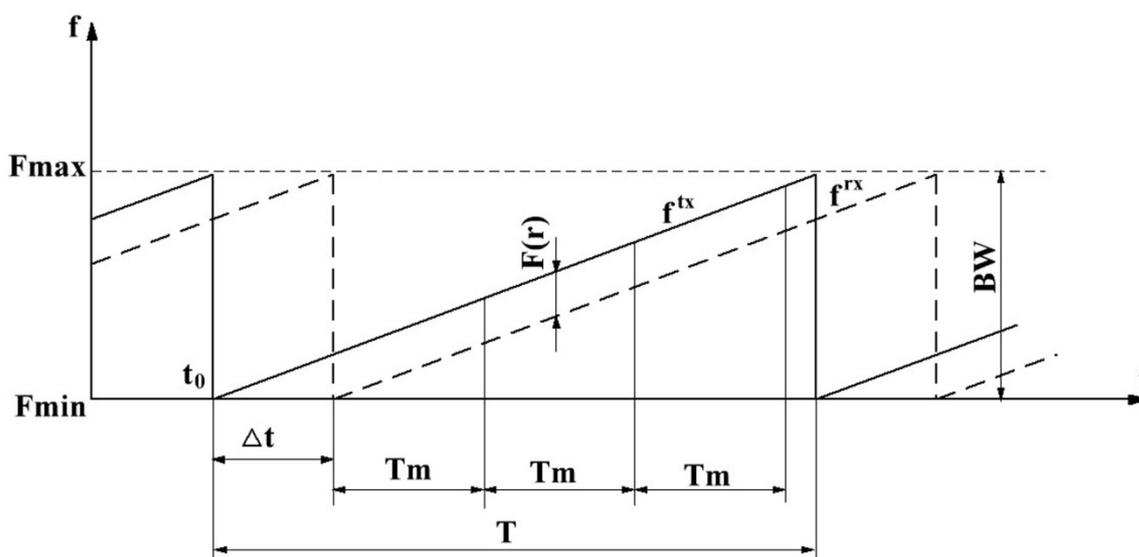


Рисунок 2 – Временной цикл измерений
Figure 2 – Time cycle of measurements

Из рисунка 2 видно, что начальный участок Δt периода повторения зондирующего сигнала использовать для измерений не имеет смысла, так как в это время отражённого полезного сигнала ещё нет, поэтому в этот промежуток будет измеряться только шум, что ухудшит общее соотношение сигнал/шум. Величина этого интервала определяется условием (5)

$$\Delta t = \frac{2R_{\max}}{c}, \quad (5)$$

а длительность периода зондирования по времени должна выбираться из условия (6)

$$\Delta t + T_m \leq T \leq BW, \quad (6)$$

где BW – допустимая полоса частот, выделенная для работы РЛС.

Скорость изменения частоты b следует выбирать минимально возможной для получения наилучшего соотношения сигнал/шум (3). Однако имеется несколько ограничений на минимальную скорость сканирования. Во-первых, дискрет по частоте должен быть больше максимально возможной доплеровской скорости цели. В настоящее время самым быстрым морским судном в мире является паром-катамаран «Франциско», способный развивать скорость 30 м/с (58 узлов), что соответствует доплеровской скорости 30 Гц. Во-вторых, нестабильность опорного генератора РЛС должна быть значительно меньше разрешающей способности РЛС по частоте Δf . Для выбранного опорного генератора $\delta_f = 5 \cdot 10^{-9}$ и рабочей частоты 150 МГц дискрет по частоте должен быть более $5 \cdot 10^{-9} \cdot 150 \cdot 10^6 = 0,75$ Гц. В-третьих, длительность периода зондирования, равная времени когерентного накопления, ограничивает минимально возможную разрешающую способность по частоте значением $1/260 \text{ мс} = 3,85$ Гц. Таким образом, для обеспечения разрешающей способности по частоте $\Delta f = 30$ Гц достаточно время измерения ограничить величиной $T_m = 1/30 = 0,033 \text{ с}$, то есть, можно выполнить не менее 7 циклов измерения на периоде зондирования.

Количество замеров, которое необходимо выполнить за цикл измерений (7), определяется дальностью обнаружения и разрешающей способностью по дальности, задаваемой тактико-техническими характеристиками радиолокатора.

$$N \geq 2 \frac{R_{\max}}{\Delta r}, \quad (7)$$

где Δr – разрешающая способность по дальности.

На практике число N , как правило, выбирается равным степени числа два, так как для вычисления спектра чаще всего используется быстрое преобразование Фурье (БПФ). Для дальности обнаружения 36 км и разрешающей способности по дальности в 100 метров число замеров в цикле измерений должно быть не менее 720. Ближайшее большее число, равное степени числа два, будет 1024. Скорость изменения частоты должна быть такой, чтобы за время, необходимое радиоволне дважды пройти расстояние, равное разрешающей способности РЛС по дальности, частота передающего устройства изменилась на величину Δf

$$b = \Delta f \frac{c}{2\Delta r}. \quad (8)$$

Для обеспечения разрешающей способности по дальности 100 метров необходимо обеспечить диапазон сканирования по частоте 1,5 МГц. Необходимый темп оцифровки сигнала t_c равен $(T_m/N) = 0,033/1024 = 32 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. В прототипе разрабатываемого локатора (П-18М, разработанного и производимого в ТОО СКТБ «Гранит») такт оцифровки аналого-цифрового преобразователя составляет 2 мкс. Потребуется применение прореживания в 16 раз. Коэффициент шума у П-18М 1 дБ (1,26 раз), а используемый в этих локаторах алгоритм параметрического обнаружения со стабилизацией уровня ложных тревог обеспечивает вероятность правильного обнаружения 0,8 (при вероятности ложных тревог 10^{-6}) при превышении сигнала над шумом на 10 дБ. Таким образом, пороговый уровень обнаруживаемого приёмным устройством сигнала $P_{\text{пр_мин}}$ составит:

$$P_{\text{пр_мин}} = 10kt^0 \Delta f = 10 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 30 = 1,24 \cdot 10^{-18} \text{ Вт}, \quad (9)$$

где k – постоянная Больцмана (Дж/К); t^0 – температура окружающей среды в градусах Кельвина; Δf – разрешение по частоте (Гц).

Как следует из уравнений (4, 9), для минимизации мощности шумов приёмного устройства следует минимизировать разрешение по спектру в приёмном устройстве, а это возможно только при снижении скорости сканирования b (8).

В нашем случае, так как морские цели находятся на поверхности моря в отличие от воздушных целей, для расчёта энергетического потенциала РЛС правильнее использовать уравнение радиолокации для низколетающих целей (10). Оно учитывает интерференцию прямого сигнала от цели и сигнала, переотражённого от поверхности моря [13].

$$r_{\max} = \sqrt[8]{\frac{P_{\text{nep}} G_{\text{nep}} S_{\text{э}} S_{\text{np}}}{P_{\text{np_мин}} \lambda^4} 16\pi^2 (h_1 h_2)^4}, \quad (10)$$

где, кроме общепринятых обозначений, $S_{\text{э}}$ – ЭПР цели, а h_1 и h_2 – соответственно, высота антенны РЛС и цели.

Коэффициент усиления передающей антенны и эффективная площадь приёмной антенны в данной формуле соответствуют максимальному их значению. Большинство уравнений, включая уравнение (10), приводятся в литературе для случая импульсных РЛС без применения когерентного накопления сигналов. В них полоса фильтра основной селекции приёмного устройства оптимизирована для приёма излучаемого локатором импульса с конкретной длительностью. Для локаторов с когерентным накоплением (в частности, для локаторов непрерывного излучения) к отношению излучаемой мощности P_{nep} к минимальной пороговой принимаемой мощности $P_{\text{np_мин}}$ добавляется коэффициент сжатия импульсов (*Pulse Compression Ratio, PCR*), равный отношению времени накопления t_n к длине строка времени t_c (такту АЦП). С учётом этого уравнение (10) можно переписать в виде:

$$r_{\max} = \sqrt[8]{\frac{P_{\text{nep}} t_n G_{\text{nep}} S_{\text{э}} S_{\text{np}}}{P_{\text{np_мин}} t_c \lambda^4} 16\pi^2 (h_1 h_2)^4}. \quad (11)$$

Приняв за минимальное время накопления 260 миллисекунд, а минимальную высоту катера – 1 метр, получим все необходимые данные для проведения расчёта энергетического потенциала РЛС. Если длительность накопления сделать большим, то необходимо будет учитывать снижение эффективности накопления (2). Неизвестными для расчёта будут мощность передающего устройства, коэффициент усиления передающей антенны и эффективная площадь приёмной антенны. Приняв, что конструкции приёмной и передающей антенн будут идентичными, мы можем заменить в формуле эффективную площадь приёмной антенны на её коэффициент усиления через преобразование (12):

$$S_{\text{np}} = G \frac{\lambda^2}{4\pi}. \quad (12)$$

Выражение (11) приобретает вид:

$$r_{\max} = \sqrt[8]{\frac{P_{\text{nep}} t_n G^2 S_{\text{э}}}{P_{\text{np_мин}} t_c \lambda^2} 4\pi (h_1 h_2)^4}. \quad (13)$$

ЭПР надводных целей в метровом диапазоне волн исследованы недостаточно, так как для локации этих целей обычно используются частоты гигагерцового диапазона. В работе [14] приводятся типичные значения ЭПР таких целей для X диапазона:

- плывущий человек – 0,02...0,05 м²;
- вежа – 0,1...0,2 м²;
- буй – 3,0 м²;
- мелкие катера – 50 м².

Однако для случаев, когда геометрические размеры объектов соизмеримы с длиной волны РЛС, релейское рассеивание радиоволн переходит в диффузное. Соответственно в сторону РЛС переизлучается большая доля падающего на объект сигнала. Это приводит к увеличению ЭПР объектов. Так, в работе [15] приведены ЭПР основных воздушных целей, экспериментально измеренные в разных диапазонах частот.

Так, например, ЭПР управляемого реактивного снаряда в передней полусфере (при его приближении) в сантиметровом диапазоне волн 0,02-0,03 м², в дециметровом диапазоне - 0,03-0,07 м², а в метровом диапазоне волн возрастает до 0,7-2,5 м². Для малоразмерных целей

ЭПР возрастает примерно в 10 раз при переходе от сантиметровых волн (X диапазон) к метровым волнам, в то же время ЭПР более крупных целей возрастает незначительно. С учётом этого обстоятельства выберем в качестве базового значения ЭПР для проведения расчётов значение 50 м^2 .

Так как мешающие отражения от морской поверхности (как следует из таблицы 1.5 [14]) для случаев горизонтальной поляризации радиоволн, углов скольжения менее 10 градусов (что соответствует нашему случаю) и частотах РЛС менее 1,5 ГГц являются незначительными, то ими можно пренебречь.

Преобразовав уравнение (13) и подставив среднюю высоту катера 1 метр, а высоту подъёма антенны РЛС 10 метров (что соответствует радиогоризонту 11,29 км), получим:

$$P_{\text{пер}} G^2 = \frac{P_{\text{пр-мин}} t_c \lambda^2 r_{\text{max}}^8}{t_n S_s 4\pi (h_1 h_2)^4} = \frac{1,24 \cdot 10^{-18} \cdot 32 \cdot 10^{-6} \cdot 2^2 \cdot 1,13^8 \cdot 10^{32}}{0,26 \cdot 50 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 1^4} = 25,92 \cdot 10^3 \text{ Вт}. \quad (14)$$

При использовании в качестве приёмной и передающей антенн сдвоенных вертикально широкополосных антенн «волновой канал», используемых в изделии П-18М с коэффициентами усиления 16 на каждую антенну, коэффициент усиления сдвоенной антенны возрастает на 3 дБ (в 2 раза). Коэффициент усиления приёмной и передающей антенн при этом будет равен 32, а произведение их коэффициентов усиления составит $32 \cdot 32 = 1024$. Следовательно, необходимая мощность передающего устройства с учётом полученного в (14) значения составит всего 25,3 Вт.

Выводы

Настоящий расчёт подтверждает возможность обнаружения малых надводных целей радиолокаторами непрерывного излучения со сравнительно маломощными передающими устройствами.

Так как стоимость радиолокационных станций во многом определяется стоимостью передающих и антенно-фидерных устройств, локаторы непрерывного излучения с высокостабильными опорными генераторами могут найти широкое применение в связи с относительно невысокой стоимостью.

Полученные расчёты легли в основу разработки опытного образца радиолокатора, создаваемого в рамках программно-целевого финансирования, для обнаружения малоразмерных плавательных средств.

Работа выполнена в рамках исследования, финансируемого Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № BR109009-0221).

Библиографический список

1. РЛС «Малахит»: рекордсмен по дальности обнаружения самолетов. Military navigator (военный информационный портал) URL: <http://www.milnavigator.com/rls-malaxit-rekordsmen-po-dalnosti-obnaruzheniya-samoletov/> (дата обращения: 10.07.2017).
2. Адамов Т. Н., Васильев И. В., Козин И. Д., Проценко В. А., Федупина И. Н. Возможности использования РЛС П-18М для обнаружения морских целей // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2018 [текст]: сб. тр. междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.1/ под общ. ред. О. В. Миловзорова. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2018; Рязань. 238 с.: ил. С. 72-76.
3. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография под ред. А.В. Соколова. М.: Радиотехника, 2003. 512 с.: ил.
4. Зимин С. РЛС дальнего обнаружения для ПРО. ПРО «Ветераны полигона ПРО», <https://veteran.priozersk.com/articles/3355>, (дата обращения: 24.02.2021).
5. Васильев И. В., Петровский В. Г. Обнаружение БПЛА с использованием РЛС метрового диапазона // Современное состояние и перспективы развития БПЛА в Республике Казахстан: Материалы Международной научно-теоретической конференции, 24 сентября 2020: Сборник статей и докладов, каталог БПЛА мировых производителей – Нур-Султан, Республика Казахстан, 2020. С. 57-59.
6. Воробьев П. В. и др. Макет когерентной РЛС для исследования атмосферы и поверхности моря на частоте 150 МГц. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Новосибирск, 1994. 16 с.

7. **Нефедов С. И.** Сравнительный анализ эффективности когерентного, некогерентного и межобзорного когерентного накопления принятого эхо-сигнала / С. И. Нефедов // Радиолокация, навигация, связь: XX Международная научно-техническая конференция, Воронеж, 15-17 апреля 2014 года. Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2014. С. 1571-1578. EDN VQOIOV.

8. Приборэлектро. Ч1-84. Рубидиевый опорный генератор // URL <https://www.priborelektro.ru/product/catalog/standarty-chastoty-i-vremeni-37/3443.html>, (дата обращения: 06.12.2022).

9. All-Pribors. Генераторы опорные рубидиевые P400/01. URL <https://all-pribors.ru/opisanie/61691-15-r400-01-70170>, (дата обращения: 06.12.2022).

10. **Kurt Peek.** Estimation and compensation of frequency sweep nonlinearity in FMCW radar. The University of Twente, 2011. 66 с.

11. **Arxiv.org Junhyeong Park и др.** Leakage Mitigation and Internal Delay Compensation in FMCW Radar For Small Drone Detection. URL <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1807/1807.06324.pdf>, (дата обращения: 30.05.2021).

12. Радиолокатор с непрерывным излучением: пат.34521 РК: МПК8 G01S 13/00 (2006.01); G01S 3/46 (2006.01) / **Алтынбеков Р. М., Васильев И. В., Мартикьян А. С., Салий С. М., Съедин Д. Б.**, заявитель и патентообладатель Съедин Дмитрий Борисович – № 2019/0468.1; заявл. 25.06.2019; опубл. 21.08.2020, Бюл. № 33. <https://ebulletin.kazpatent.kz/patents/2328/1/0/G>, 7 с.

13. **Сиверс А. П.** Основы радиолокации : [Учеб. пособие для радиотехн. специальностей высш. учеб. заведений] / **А. П. Сиверс, Н. А. Суслов, В. И. Метельский.** Ленинград: Судпромгиз. 1959. 351 с.

14. **Дуров А. А., Кан В. С., Ничипоренко Н. Т., Устинов Ю. М.** Судовая радиолокация. Судовые радиолокационные системы и САРП. Учебник для вузов. Изд. 2-е, переработанное и исправленное. П.-Камчатский, КамчатГТУ, 2005. 280 с. Ил., табл., библиогр. назв.

15. Основы теории радиолокации. Радиолокационная система РТВ. Сибирский федеральный университет, <https://ppt-online.org/199185> (дата обращения: 23.02.2021).

UDC 621.396.962.25

PECULIARITIES OF CALCULATION OF THE ENERGY POTENTIAL OF METER-WAVE CW RADAR

I. V. Vassilyev, Ph.D. (Phys. and Math.), Director of the department, JSC Special Design and Technology Bureau «Granit», Almaty, Republic of Kazakhstan;
orcid.org/0000-0002-6216-0443, e-mail: iv@granit.kz

S. M. Saliy, candidate in military sciences, Associate professor, Head of the Scientific Department, The Academy of the Border Service of the National Security Committee of Kazakhstan Republic, Almaty, Republic of Kazakhstan;
orcid.org/0000-0003-3590-8062, e-mail: salii70@mail.ru

D. B. Syedin, candidate in military sciences, associate professor, Associate professor, Deputy Head, Faculty for Scientific Work, The Academy of the Border Service of the National Security Committee of Kazakhstan Republic, Almaty, Republic of Kazakhstan;
e-mail: anna4seredina8@gmail.com

The paper discusses the features of calculating the detection range of marine targets for continuous-radiation radars of meter wave range. The information is provided on the prospects for using meter wavelength range for long-range detection of small targets, such as small boats and unmanned aerial vehicles, which make the development of low-cost mobile radars with chirp signals relevant. Limitations of tactical and technical characteristics of radars associated with the stability of master oscillators, Doppler velocity and the duration of coherent accumulation intervals are shown. The value of radar energy potential loss is estimated when using master oscillators with the frequency stability insufficient for coherent accumulation over long intervals of up to 10 seconds. The example of calculating the energy potential for detecting a boat at a distance of 11 km for the radar designed on the basis of systems used in P-18 M radar produced in the Republic of Kazakhstan is given.

Key words: UAV, FFT, coherence, chirp, sea target, accumulation, radar, resolution, frequency stability, RCS.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-83-13-21

References

1. RLS «Malahit»: rekordsmen po dal'nosti obnaruzhenija samoletov (Radar "Malachite": the record holder for the detection range of aircraft). Military navigator (vo-ennoj informacionnyj portal) URL: <http://www.milnavigator.com/rls-malahit-rekordsmen-po-dalnosti-obnaruzheniya-samoletov/> (data obrashhenija: 10.07.2017).

2. Adamov T. N., Vassilyev I. V., Kozin I. D., Procenko V. A., Fedulina I. N. Vozmozhnosti ispol'zovanija RLS P-18M dlja obnaruzhenija morskikh celej (Possibilities of using the P-18M radar for detecting marine targets). *Sovremennye tehnologii v nauke i obrazovanii – STNO-2018 [tekst]: sb. tr. mezhdunar. nauch.-tehn. foruma: v 10 t, vol.1. / pod obshh. red. O.V. Milovzorova. Rjazan': Rjazan. gos. radiotehn. un-t, 2018; Rjazan'. 238 p.: il, pp. 72-76. (in Russian).*

3. *Voprosy perspektivnoj radiolokacii. (Questions of advanced radar). Kollektivnaja monografija pod red. A.V. Sokolova. Moscow: Radiotekhnika, 2003. 512 p.: il. (in Russian).*

4. Zimin S., RLS dal'nego obnaruzhenija dlja PRO (Early warning radar for missile defense). RRO «Veterany poligona PRO». <https://veteran.priozersk.com/articles/3355>, (data obrashhenija: 24.02.2021). (in Russian).

5. Vassilyev I. V., Petrovskij V. G. Obnaruzhenie BPLA s ispol'zovaniem RLS metrovogo diapazona (Detection of UAVs using meter range radar). *Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija BPLA v Respublike Kazahstan: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-teoreticheskoj konferencii, 24 sentjabrja 2020: Sbornik statej i dokladov, katalog BPLA mirovyh proizvoditelej – Nur-Sultan, Respublika Kazahstan, 2020, pp. 57-59. (in Russian).*

6. Vorob'jov P. V. i dr. Maket kogerentnoj RLS dlja issledovanija atmosfery i poverhnosti morja na chastote 150 MHz (Model of a coherent radar for the study of the atmosphere and sea surface at a frequency of 150 MHz). *Institut jadernoj fiziki im. G. I. Budkera SO RAN, Novosibirsk, 1994. – 16 p. (in Russian).*

7. Nefedov S. I. Sravnitel'nyj analiz jeffektivnosti kogerentnogo, nekogerentnogo i mezhobzornogo kogerentnogo nakoplenija prinjatogo jeho-signalu (Comparative analysis of the efficiency of coherent, noncoherent and intersurvey coherent integration of the received echo-signal) / S. I. Nefedov. *Radiolokacija, navigacija, svjaz': XX Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija, Voronezh, 15-17 aprelja 2014 goda. Voronezh: NPF «SAKVOEE» OOO, 2014, pp. 1571-1578. EDN VQOIOV.*

8. *Priborelektro. CHI-84. Rubidievij opornij generator. URL https://www.priborelektro.ru/product/catalog/standarty-chastoty-i-vremeni-37/3443.html, (data obrashcheniya: 06.12.2022).*

9. *All-Pribors. Generatory opornye rubidievye R400/01. URL https://all-pribors.ru/opisanie/61691-15-r400-01-70170, (data obrashcheniya: 06.12.2022).* 10. Kurt Peek. *Estimation and compensation of frequency sweep nonlinearity in FMCW radar. The University of Twente, 2011. 66 p.*

11. **Arxiv.org Junhyeong Park et al.** *Leakage Mitigation and Internal Delay Compensation in FMCW Radar For Small Drone Detection. URL https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1807/1807.06324.pdf, (data obrashhenija: 30.05.2021).*

12. Radiolokator s nepreryvnym izlucheniem (Continuous-wave radar): pat.34521 RK : MPK8 G01S 13/00 (2006.01); G01S 3/46 (2006.01) / **Altynbekov R. M., Vassilyev I. V., Martik'jan A. S., Saliy S. M., Syedin D.B.** Zajavitel' i patentoobladatel' S#edin Dmitrij Borisovich, no. 2019/0468.1; zajavl. 25.06.2019; opubl. 21.08.2020, Bjul. №33. <https://ebulletin.kazpatent.kz/patents/2328/1/0/G>, 7 p. (in Russian).

13. **Sivers Arkadij Petrovich.** *Osnovy radiolokacii (Radar basics): [Ucheb. posobie dlja radiotehn. special'nostej vyssh. ucheb. zavedenij] / A. P. Sivers, N. A. Suslov, V. I. Metel'skij. Leningrad: Sudpromgiz, 1959. 351 p. (in Russian).*

14. **Durov A. A., Kan V. S., Nichiporenko N. T., Ustinov Ju. M.** *Sudovaja radiolokacija. Sudovye radiolokacionnye sistemy i SARP (Marine radar. Marine radar systems and ARPA). Uchebnik dlja vuzov. Izd. 2-e, pererabotannoe i ispravlennoe. P.-Kamchatskij, KamchatGTU, 2005. 280 p. Il., tabl., bibliogr. nazv. (in Russian).*

15. *Osnovy teorii radiolokacii. Radiolokacionnaja sistema RTV (Fundamentals of the radar theory. Radar system of Radio-Technical Troops). Sibirskij federal'nyj universitet, https://ppt-online.org/199185, (data obrashhenija: 23.02.2021). (in Russian).*