DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.2.9

УДК: 621.396.96

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЗКОПОЛОСНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ СИГНАЛОВ

Г.Я. Шайдуров, А.В. Когтин

Военно-инженерный институт Сибирского федерального университета
660041, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Академгородок 13А

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2023 г.

Аннотация. Рассматриваются способы радиолокации с узкополосным излучением путем коммутации диаграммы направленности антенны вокруг равносигнальной зоны, либо в ортогональных плоскостях, позволяющие существенно (на десятки дБ) снизить мощность передатчика за счет сужения полосы пропускания приемника. Дальность до цели определяется вычислением разности фаз принятого сигнала на частоте коммутации опорного сигнала этой частоты стабилизируемой кварцевым генератором. Показана возможность повышения точности измерения дальности за счет введения двух шкал: грубой, определяемой частотой коммутации, длина волны которой соответствует двойной дальности до цели, и точной, с более высокой частотой коммутации. Поскольку требуемая мощность излучения передатчика в узкополосном случае определяется помехоустойчивостью фазовых измерений, то при заданной дальности действия системы, путем увеличения мощности передатчика, можно снизить погрешность измерения дальности. Как известно, в импульсном методе радиолокации точность оценки дальности ограничена длительностью излучаемого импульса и практически не зависит от мощности передатчика. По этой причине используемые радиолокационные станции (РЛС) не позволяют обеспечить точность оценки их координат лучше, чем десятки

метров. Возможный вариант решения подобной задачи является использование непрерывных сигналов с частичной модуляцией, однако требующей широкой полосы пропускания приемников определяемой девиацией частоты, что существенно снижает помехоустойчивость системы. Недостатком описываемого ниже метода узкополосной радиолокации с пространственной модуляцией сигнала является невозможность различения целей, находящихся на одном азимуте. Однако в целом ряде задач, например, при использовании в высотомерах, высокоточных радиогеодезических измерений и др. использование описываемых в статье вариантов РЛС дают возможность повысить точность измерения дальности не достигаемой другими методами. Основным преимуществом нового метода является: скрытность; высокая помехоустойчивость; минимальная мощность излучения передатчика; возможность быстрой смены несущей частоты, независимость от скорости движения цели, поскольку измерения фазы сигнала определяется лишь частотой коммутации.

Ключевые слова: радиолокация, узкополосная, пространственная модуляция, амплитуда, частота, коммутация, дальность, измерения, фазоразностные.

Автор для переписки: Когтин Алексей Владимирович, kogtinaleksei@rambler.ru.

Введение

Сегодня широко используется импульсный способ радиолокации для обнаружения различных объектов и оценки их координат на больших дальностях [1].

При этом точность оценки дальности определяется длительностью излучаемого импульса, что обуславливает использование в приемнике РЛС широкой полосы пропускания, а от передатчика требуется высокая мощность излучения в импульсе. Широкая полоса приемника снижает помехоустойчивость за счет подавления сигнала РЛС прицельным радиоизлучением, а высокая потребляемая мощность передатчика ведет

к повышению общей массы РЛС и значительным энергозатратам источников электропитания.

Указанные проблемы обуславливали создание на заре радиолокации в 30-х годах прошлого века разнесенных по пространству передатчиков и приемников с излучением узкополосных радиосигналов с работой на разные антенны.

Безусловным преимуществом импульсных РЛС является работа приемо-передатчиков на одну общую антенну.

В настоящее время используются радиолокаторы с непрерывным излучением типа CW-radar (Continuous Wave Radar – РЛС с непрерывным излучением) для обнаружения движущихся целей по доплеровскому смещению частоты, однако такие РЛС не могут работать по неподвижным и малоскоростным целям.

Известен также автодинный способ узкополосной радиолокации с работой на одну антенну [2], однако, при работе на больших дальностях, когда требуется большая энергетика, этот способ не применяется из-за проблематичности защиты приемных трактов РЛС от мощного излучения передатчика.

В патенте США [3] описывается импульсная радиолокационная система определения местоположения объекта. Эта система содержит все основные элементы моноимпульсного радиолокатора с вращением диаграммы направленности антенны (ДНА) вокруг равносигнальной зоны. Моноимпульсные РЛС требуют использование широкополосных приемников с недостатками этот режима описанными выше.

В выпуске новостей [4] опубликовано сообщение о разработке Школой электроники Тель-Авивского университета (Израиль) радара с низкой пропускной способностью, свободного от ограничений полосы пропускания. Поскольку принципы работы этой системы в сообщении не изложены, то возможно это также относится к вопросам, обсуждаемым в настоящей статье.

Авторами запатентован в России узкополосный метод обнаружения малых беспилотных аппаратов [5] и способ радиолокации любых целей [6]. В [7, 8, 9] представлены публикации по прикладным проблемам использования узкополосной радиолокации.

Физико-технические основы метода

Ниже рассматривается способ узкополосной радиолокации, исключающий указанные выше недостатки импульсных РЛС, позволяющий работать на малых и больших дальностях, в том числе с реализацией аппаратного комплекса в переносном варианте.

На рис. 1, 2 представлены структурная схема подобной РЛС и эпюры сигналов, в основу работы которой положен принцип работы передатчика и приемника на одной несущей частоте с поочередной коммутацией диаграммы направленности реализуемый излучением радиосигнала смещенными относительно друг друга активными вибраторами 3, 4 питаемыми от передатчика 5 через управляемый коммутатор 6 и циркуляторы 7, 8.

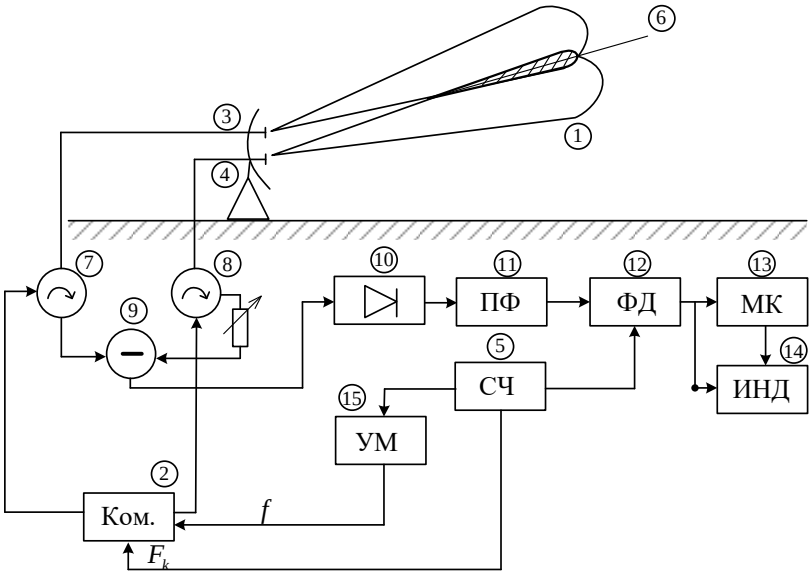

Рис. 1. Структурная схема узкополосной РЛС с коммутацией диаграммы направленности вокруг равносигнальной зоны.
1 – диаграмма направленности; 2 – коммутатор; 3, 4 – вибраторы; 5 – синтезатор частот; 6 – равносигнальная зона; 7, 8 – циркуляторы; 9 – вычитающая схема; 10 – амплитудный детектор; 11 – полосовой фильтр; 12 – фазовый детектор; 13 – микроконтроллер; 14 – индикатор; 15 – усилитель мощности.

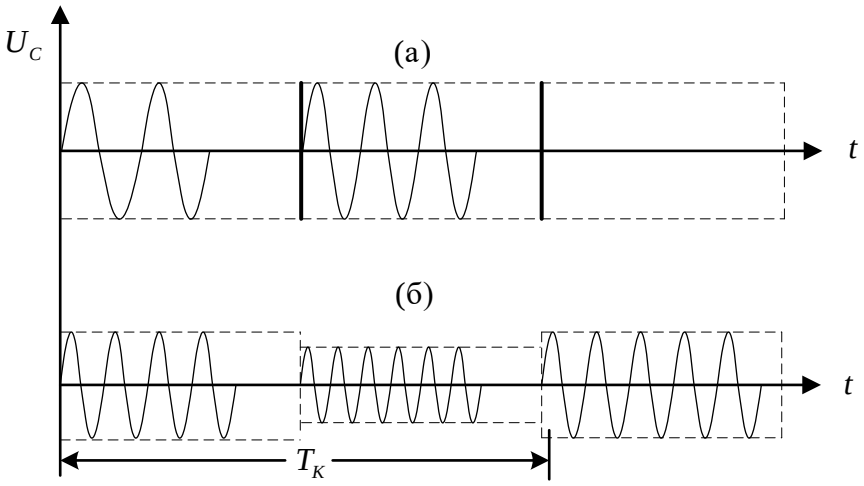

Рис. 2. Эпюры сигналов: (а) – излучаемый; (б) – принимаемый.

Приемные выходы этих циркуляторов через схему вычитания 9 подсоединены к амплитудному детектору 10, выделяющими из принятого радиосигнала низкочастотные сигналы частоты коммутации вибраторов, которые через полосовой фильтр 11 подаются на фазовый детектор 12 используемый для оценки дальности с помощью микроконтроллера 13 и индикатора дальности 14. Для компенсации излучения передатчика в приемную цепь одного из циркуляторов включена линия задержки на время полупериода частоты коммутации.

Сигналы несущей частоты передатчика f и частоты коммутации $F_к$ формируются синтезатором частоты 5.

Необходимый уровень излучаемого сигнала обеспечивается усилителем мощности 15. Возможен вариант пространственной модуляции отраженного радиосигнала путем поочередной коммутации двух ортогональных вибраторов, расположенных в фокусе антенны рис. 3, что позволяет периодически изменять поляризацию электромагнитной волны по двум ортогональным плоскостям E_X, E_Z.

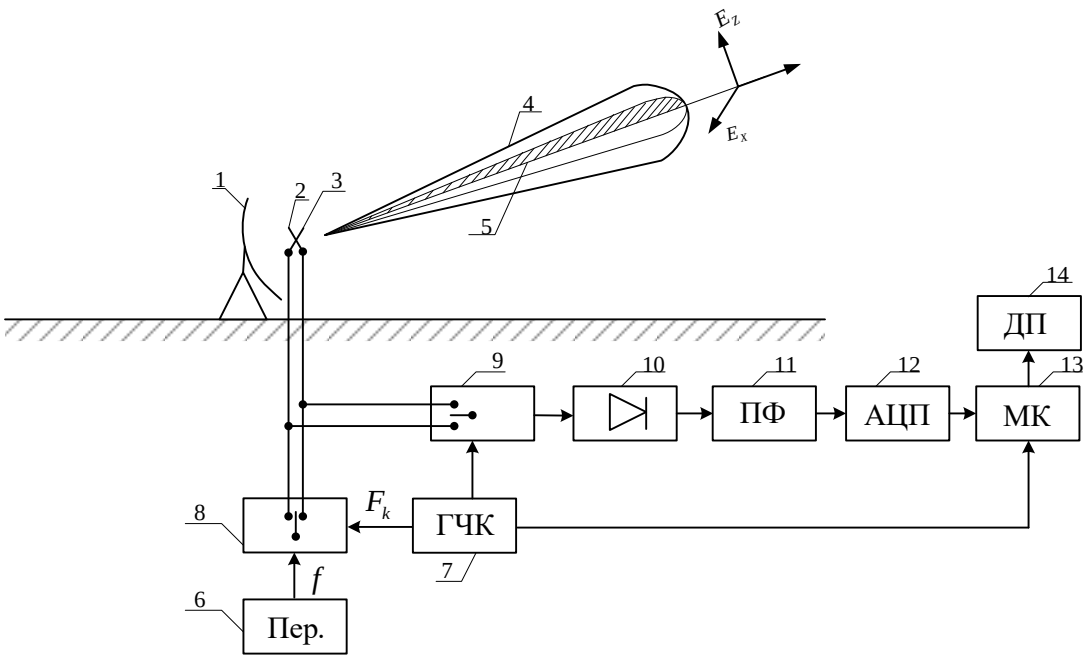

Рис. 3. Схема с коммутацией плоскости поляризации диаграммы направленности. 1 – зеркало антенны; 2, 3 – активные вибраторы; 4 – ДНА E_Z; 5 – ДНА E_X; 6 – передатчик; 7 – генератор частоты коммутации; 8, 9 – коммутаторы; 10 – амплитудный детектор; 11 – полосовой фильтр; 12 – АЦП; 13 – микроконтроллер; 14 – дисплей

В этом случае приемом сигналов ведется в максимуме диаграммы направленности с необязательным использованием для развязки сигналов передатчика и приемника циркуляторов. Вместо них вводится второй коммутатор подключающего вибраторы к входу приемника поочередно.

Энергетические оценки

Отраженный от цели радиосигнал, поступающий на амплитудный детектор 10, запишем как:

$$U(t) = U_m \sqrt{m} \cdot exp(-j\omega t) sin(\Omega_к + \varphi_1), \quad (1)$$

где:

U_m – амплитуда сигнала;

$m = \dfrac{\sigma_x - \sigma_z}{\sigma_x + \sigma_z}$ – коэффициент модуляции, определяемой отношением эффективных поверхностей рассеивания (ЭПР) цели при пространственном смещении диаграммы направленной антенны относительно ее поверхности;

ω – несущая частота радиосигнала;

$\Omega_к$ – радиальная частота коммутации;

φ_i – фаза отражённого сигнала.

В этом случае считается, что отраженные радиосигналы являются некоррелированными случайными функциями.

Разность фаз принятого сигнала чистоты коммутации и опорного позволяют определить дальность до цели r:

$$\varphi = 2\Omega_к \frac{r}{c}, \tag{2}$$

где:

$\Omega_к$ – радиальная частота коммутации;

c – скорость распространения радиоволн;

r – дальность до цели.

Требуемая мощность излучения передатчика в режиме обнаружения определяется известным соотношением из уравнения дальности:

$$P = \frac{(4\pi)^2 r^2 q P_ш \, e^{-2\alpha r}}{\sigma_ц G_A S_A m}, \tag{3}$$

где:

r – дальность до цели;

q – требуемое отношение сигнал/помеха+шум по мощности;

$P_ш$ – мощность шума на входе приёмника;

α – коэффициент поглощения радиоволны атмосферой;

$\sigma_ц$ – ЭПР цели;

m – коэффициент модуляции;

G_A, S_A – соответственно коэффициент направленности действия и эффективная площадь антенны, $G_А = 4\pi \frac{S_А}{\lambda^2}$;

$Р_ш = kT_k^0 \Delta f_у$;

k – постоянная Больцмана;

T_k^0 – температура шумов приемника;

$\Delta f_у$ – его полоса пропускания;

λ – длина волны.

При одинаковых значениях указанных параметров, выигрыш по мощности передатчика узкополосной РЛС по сравнению с импульсной в режиме обнаружения оценивается как:

$$\gamma = \frac{P_u}{P_y} = \frac{\Delta f_u}{\Delta f_y}. \qquad (4)$$

При следующих параметрах:

r = 100 км; $e^{-2\alpha r}$ = 0,1; q = 10; $\sigma_ц$ = 1 м^2; S_A = 1 м^2; f = 10 ГГц; G_A = 1,4·10^4; m = 1; $\Delta f_и = \frac{1}{\tau_и} \approx$ 1МГц, где: τ_u = 1 мкс – длительность излучаемого импульса;

из (3) получим требуемую мощность передатчика в импульсном режиме: P_u = 180 кВт, согласно (4), в узкополосном режиме излучаемая мощность составит P_y = 0,9 Вт.

Поскольку прием ведется через полосовой фильтр 11, настроенный на частоту коммутации, полоса пропускания которого определяется лишь нестабильностью частоты опорного генератора, то без учета доплеровского смещения частоты можно принять Δf_y = 10 Гц.

Выигрыш по излучаемой мощности составит более 50 дБ. Таким образом, в узкополосном режиме, излучаемая мощность передатчика снижается до уровня единиц ватт, что позволяет реализовать РЛС с фазированной антенной решеткой (ФАР) в переносном варианте. Если число активных элементов ФАР (вибраторов) составляет величину порядка 100, то на каждый этот элемент будет рассеиваться мощность 10 мВт, что вполне позволяет применить автодинный режим работы на одну приемо-передающую антенну. Узкополосный режим позволяет решать задачу оценки дальности путем измерения разности фаз излучаемого и принимаемого радиосигналов, в описываемом здесь варианте, предлагается решить эту задачу путем фазоразностных измерений на частоте коммутации F_k.

При этом, для исключения неоднозначности фазовых измерений, необходимо частоту коммутации использовать с длиной волны не менее чем в два раза превышающую максимально возможную дальность действия РЛС. Для повышения точности дальнометрии возможно использовать две шкалы

измерения дальности грубую и точную, работающую на повышенной частоте F_T, период которой определяется погрешностью грубой шкалы.

При изменении дальности фазовым методом расстояние до цели определяется как:

$$r_{\text{ц}} = \frac{\varphi c}{2\Omega_{\text{к}}}. \tag{5}$$

Здесь: φ (рад) – сдвиг фаз сигнала на частоте коммутации; c – скорость распространения радиоволн; $\Omega_k = 2\pi F_k$ – круговая частота коммутации.

Откуда среднеквадратичная погрешность измерения дальности:

$$\pm\Delta r = \frac{\delta r}{\delta\varphi}\Delta\varphi, \tag{6}$$

где: $\Delta\varphi$ – погрешность измерения сдвига фаз,

$$\pm\Delta\varphi = 2\pi F_k \frac{\Delta r}{C}. \tag{7}$$

Согласно [10], среднеквадратичная ошибка измерения фазы может быть определена как:

$$\Delta\varphi^2 = \frac{1}{\text{q}\Delta f_{\text{э}} T_{\text{Н}}}. \tag{8}$$

Здесь q – отношение сигнал/помеха плюс шум по мощности на входе приемника, $\Delta f_э$ – эффективная полоса пропускания приемника, $T_н$ – время наблюдения:

$$q = \frac{P_{\text{С}}}{P_{\text{П}} + P_{\text{Ш}}}. \tag{9}$$

Из (8) понятно, что погрешность измерения дальности можно снизить за счет увеличения мощности передатчика при заданных величинах $\Delta f_э$, $T_н$.

Опуская в (9) внешние помехи, оценим требуемую мощность излучения узкополосного передатчика обеспечивающую заданную точность измерения дальности:

$$P_{\text{у}} = \frac{(4\pi r^2)^2 k T_k^0 e^{-2\alpha r}}{T_{\text{н}}(\Delta\varphi)^2 \sigma_{\text{ц}} G_A S_A m}. \tag{10}$$

К примеру, при заданных параметрах:

r = 100 км; $P_ш = kT_k^0 \Delta f_у$; k = 1,38·10^{-23}; $T_k^0 = 300^0$; Δf_y = 10 Гц; m = 0,5;

$T_н$ = 1 с; α = 0; λ = 0,03 м; $f_н$ = 10 ГГц; S_A = 1 м^2; $\sigma_ц$ = 1 м^2; Δr = ±1000 м; при частоте коммутации $F_к = \frac{1}{Т_к} = 1500$ Гц; $Т_к = \frac{2r}{c}$; $\pm\Delta\varphi$ = 1,75·10^{-2} рад ≈ 1°, получим из (10): P_y = 30 Вт.

Из (7) на грубой шкале, ожидаемая ошибка измерения дальности: Δr_y = ±550 м. При тех же параметрах для импульсной РЛС, с длительностью импульса $\tau_и$ = 1 мкс, $\Delta r_и$ = 700 м. Если для точной шкалы принять частоту коммутации F_k = 15 кГц, то соответственно Δr_y = ±55 м.

Таким образом узкополосный режим дает неоспоримый выигрыш по мощности передатчика при сопоставимых погрешностях измерения дальности даже без использования точной шкалы. Для малоскоростных целей, допускается в (10), $T_н$ = 3 с, а мощность передатчика можно снизить до 10 Вт.

Преимуществом описываемой технологии являются: высокая помехоустойчивость и скрытность работы РЛС; малая мощность излучения передатчика; возможность работы на малых и больших дальностях; малогабаритность, за исключением размеров антенн, определяющих точность оценки угловых координат.

Недостатком узкополосной технологии является работа по одиночным и групповым целям, поскольку фазовый метод измерения не позволяет разрешить по дальности нескольких целей находящихся на одном азимуте.

Кроме того, при необходимости измерения скорости целей, существенно расширяется полоса пропускания приемника и увеличивается мощность излучения передатчика.

Несмотря на это, имеется множество прикладных задач [5, 6, 7, 8], не требующих измерения скорости цели, в которых узкополосная технология оправдана и приносит существенные преимущества, в частности: загоризонтной и подповерхностной радиолокации; при поиске взрывчатых веществ; дефектоскопии магистральных трубопроводов и железнодорожных

рельс; высокочастотных измерений расстояний, например для измерения смещений геодезических створов высотных плотин [8]; радиовысотомерах и системах обнаружения сверхмалых целей типа беспилотных аппаратов с ЭПР менее 0,01 м^2.

Заключение

1. Узкополосная радиолокация может быть реализована на одной несущей частоте путем поочередной коммутации диаграммы направленности антенны вокруг равносигнальной зоны, либо переключением плоскости поляризации излучаемых радиоволн.

2. По сравнению с импульсной технологией РЛС выигрыш по излучаемой мощности на дальности 100÷300 км может достигать 50 дБ, что позволяет с использованием фазированной антенной решетки реализовать переносную РЛС вместо крупногабаритных импульсных РЛС.

3. Для оценки дальности в узкополосном режиме предлагаются фазоразностные измерения на частоте коммутации.

Литература

1. Хохлов С.В. История отечественной радиолокации. М.: Изд. Столичная энциклопедия. 2015. С. 735.
2. Бузыкин В.Т., Носков В.Я. Автодины. Области применения и перспективы развития // Радиотехнические системы миллиметрового и субмиллиметрового диапазона волн. Харьков: Институт радиофизики и электроники АН Украины. 1991. С. 38-47.
3. Pat. USA № 2594317. Corrected Date Tracking System / Lancor J., Willston Jr., Binns J., Park F. Publ. 29.04.1952
4. Гинзбург П. Радиолокационная технология с низкой пропускной способностью обеспечивает улучшенное обнаружение объектов / Nature Communications. Тель-Авив. 2019.

5. Пат. РФ № 2622908. Радиолокационный способ обнаружения летательных аппаратов / Фомин А.Н., Шайдуров Г.Я., Гарин Е.Н. Опубл. 21.06.2017.
6. Пат. РФ № 2797828. Способ радиолокации / Шайдуров Г.Я. Опубл. 27.07.2022.
7. Кудинов Д.С., Шайдуров Г.Я. Радиолокационный параметрический метод поиска мин и минных полей в движении // Успехи современной радиоэлектроники. 2015 № 10. С. 134–139.
8. Пат. РФ № 2380259. Способ неразрушающего контроля железнодорожных рельсов в процессе движения подвижного состава и устройство для его осуществления / Шайдуров Г.Я. Опубл. 27.01.2010.
9. Пат. РФ № 2760505. Радиолокационный способ мониторинга геодезического створа высотных плотин / Шайдуров Г.Я. Опубл. 25.02.2021.
10. Чмых М.К. Цифровая фазометрия. М.: Радио и связь. 1993. С. 184.

Для цитирования:

Шайдуров Г.Я., Когтин А.В. Потенциальные возможности узкополосной радиолокации с пространственной модуляцией сигналов. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 2. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.2.9.