

О. В. Сытник, Г. П. Почанин, С. А. Масалов, В. П. Рубан, П. В. Холод

Институт радиопроизводства и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: ssvp11@ire.kharkov.ua

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ВИДЕОИМПУЛЬСНЫМ РАДАРМ

Предмет и цель работы. Предметом исследования является измерительная система, состоящая из нескольких пространственно-разнесенных приемных пунктов и передатчика, излучающего видеоимпульсные сигналы. Целью работы является создание эффективного алгоритма обработки сигналов многопозиционной системы наблюдения в условиях коррелированных помех для решения задачи оперативного обнаружения подвижных объектов, скрытых за оптически непрозрачными препятствиями.

Методы и методология работы основаны на разностно-дальномерном принципе измерения координат цели. Из-за многочисленных переотражений зондирующего сигнала от стен помещения и расположенных внутри его предметов полезный сигнал от цели не идентифицируется прямыми методами. Разработана процедура подавления интерференционных отражений зондирующего сигнала. Накопление сигнала и удаление из него интерференционных помех осуществляется в реальном масштабе времени путем вычитания череспериодных выборок наблюдаемого процесса из сигналов каждого приемного пункта в предположении о малости смещения объекта за время локального зондирования. В качестве критерия оценки длительности задержки зондирующего сигнала при его распространении от передатчика до цели и от цели к каждому из приемников выбрана величина пик-фактора сигнала. Этот же критерий используется для отбраковки пораженных помехами строк на радиолокационном изображении траектории цели.

Результаты работы. Разработан быстродействующий алгоритм, который при сравнительно высоком отношении сигнал/шум позволяет использовать пик-фактор сигнала в качестве критерия отбраковки пораженных помехой строк радиолокационного изображения и осуществить непрерывную обработку сигналов системы наблюдения с отображением данных в удобном для пользователя виде. Непрерывность измерений разностей задержек отраженного от цели сигнала до приемных пунктов обеспечивается полиномиальной аппроксимацией траекторий перемещения объекта относительно каждого из приемников.

Заключение. Высокие энергетические характеристики системы наблюдения, стабильность параметров в процессе измерений, высокая точность воспроизведения формы отраженного сигнала позволили использовать методы цифровой обработки сигналов в реальном времени. Результаты моделирования подтверждены данными, которые накапливались и усреднялись по серии однотипных экспериментов. Ил. 8. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: радиолокационная станция, сверхширокополосный сигнал, пик-фактор, видеоимпульс, алгоритм, череспериодные выборки, пространственно-разнесенная приемная система.

В настоящее время широко используются сверхширокополосные (СШП) импульсные зондирующие электромагнитные сигналы [1–3] для интроскопии объектов, скрытых оптически непрозрачными препятствиями [4–9]. Интерес к данной области радиолокации обусловлен возможностью создания систем радиовидения, которые позволят получать информацию об объектах и целях внутри замкнутых помещений [7, 8], а также систем неразрушающего контроля и систем подповерхностного видения [10–13]. Связанные с этим направлением задачи весьма обширны, что является следствием новизны этого направления и сложности имеющих место проблем. Сюда входят задачи взаимодействия СШП-импульсов с поглощающими сре-

дами [10], обладающими дисперсией, задачи идентификации подвижных объектов на фоне множественных отражений сигнала от неподвижных предметов по результатам зондирования [9], а также задачи излучения и приема несинусоидальных радиоволн [11–13]. Поскольку отраженные сигналы, принимаемые видеоимпульсным радаром, в математическом смысле представляют собой свертку импульсной характеристики исследуемой среды и зондирующего сигнала, то идентификация физического состояния среды должна осуществляться путем решения класса обратных задач [11]. При этом теоретические исследования тесно связаны с экспериментальными вопросами минимизации длительности зондирующего сигнала, создания

компактных генераторов и излучающих систем [12–14], а также вопросами обработки сигналов с целью подавления паразитных резонансных эффектов [15].

Настоящая работа посвящена проблеме обработки сигналов СШП-радаров для обнаружения и измерения координат подвижного объекта, скрытого оптически непрозрачным препятствием. Сложность задачи алгоритмизации процедуры обнаружения и идентификации цели обусловлена наличием высокого уровня когерентных помех, возникающих из-за многократных переотражений зондирующего сигнала от окружающих цель предметов. Для решения задачи рассмотрим пространственно-разнесенную приемную систему и видеоимпульсный передатчик подсветки, применяемый в георадаре [6].

1. Модель электромагнитной обстановки при неподвижных целях. При зондировании объектов в закрытых помещениях в результате многократных переотражений зондирующего сигнала от стен и предметов, расположенных в помещении, возникает достаточно сложная интерференционная картина. На ее фоне выделение искомой цели является трудоемкой задачей, а в ряде случаев это сделать практически невозможно. Поэтому обработка сигналов радиолокатора должна быть организована по двухэтапной схеме. В частности, вначале производится оценка электромагнитной обстановки при условии отсутствия подвижных целей, совокупный сигнал которой на следующем этапе обработки удаляется из результирующего сигнала, содержащего отражения от перемещающейся относительно приемной системы цели.

Рассмотрим поле, создаваемое неподвижной изотропно переизлучающей целью, которая создает в изотропной среде сферическую волну. Несмотря на простоту подобного подхода, такая модель позволяет выявить основные закономерности пространственно-временной обработки сигналов и получить результаты в наглядной форме. Эти результаты будут основой для формирования алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов реальных целей, поскольку во многих практически важных случаях они

хорошо описываются моделями в виде совокупности «блестящих» точек.

Для описания электромагнитных волн и антенной системы введем декартову систему координат с осями X, Y, Z и сферическую систему координат \vec{R}, α, β (рис. 1), где \vec{R} – радиус-вектор, определяющий положение цели; G – область задания функции раскрытия антенны; $\vec{\rho}$ – радиус-вектор произвольной точки приема в области раскрытия антенной системы.

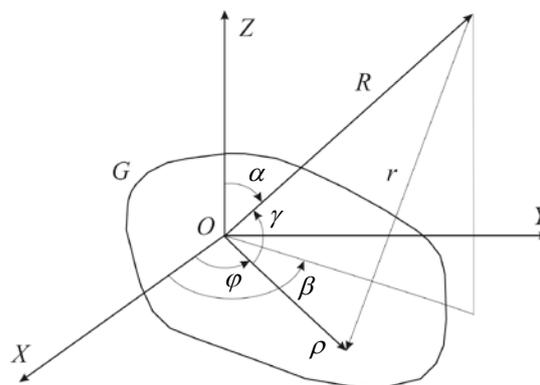


Рис. 1. Геометрия задачи о поле неподвижного отражателя

Если область G расположена в плоскости XY , то положение точки приема задается полярными координатами $\vec{\rho}, \varphi$, где γ – угол между векторами $\vec{\rho}$ и \vec{R} , при этом $\cos(\gamma) = \sin(\alpha) \cos(\beta - \varphi)$.

Пусть из начала координат O (рис. 1) излучается зондирующий сигнал

$$s(t) = \text{Re}\{\dot{s}(t)\} = \sum_{i=0}^M A_i \text{Re}\{\dot{U}_i(t) \exp(j\omega_i t)\}, \quad (1)$$

где A_i – коэффициент усиления передающей антенны на частоте i -й гармоники; $\dot{U}_i(t)$ – комплексная амплитуда i -й гармоники; ω_i – ее круговая частота.

Согласно (1), напряженность поля излученного колебания, достигающего цели, определяется соотношением

$$u(t, \vec{R}) = C_1 \sum_{i=0}^M \text{Re}\left\{\dot{s}_i\left(t - \frac{R}{c}\right)\right\}, \quad (2)$$

где R – дальность до цели; c – скорость распространения электромагнитных колебаний; C_1 – постоянный множитель.

С учетом обозначений, введенных в (2), выражение для тока, наводимого этим полем в цели, можно записать следующим образом:

$$i(t) = C_2 \sum_{i=0}^M \dot{U}_i \left(t - \frac{R}{c} \right) \exp \left[j\omega_0 \left(t - \frac{R}{c} \right) \right], \quad (3)$$

где C_2 – постоянный множитель.

Предположим, что точечная цель переизлучает сигнал изотропно. Если эффективная поверхность цели есть σ_t^2 , то напряженность поля в некоторой точке ρ приемной системы будет

$$u(t, \vec{\rho}, \vec{R}) = \frac{C_2 \sqrt{\sigma_t^2}}{r(\vec{\rho}, \vec{R})} \times \sum_{i=0}^M \operatorname{Re} \left\{ \dot{s}_i \left(t - \frac{R + r(\vec{\rho}, \vec{R})}{c} \right) \exp [j\omega_0 \vartheta_s] \right\}, \quad (4)$$

где ϑ_s – изменение фазы волны при отражении от цели.

Очевидно, что, согласно (3) и (4), поле на раскрыве антенной системы несет информацию о местоположении цели, определяемом вектором \vec{R} или координатами R, α, β . Если теперь пронормировать поле в каждой произвольной точке раскрыва к полю в точке O , то можно записать выражение для поля неподвижного источника

$$u(t, \vec{\rho}, \vec{R}) = \sum_{i=0}^M \operatorname{Re} \left\{ \frac{\dot{a} R \dot{s}_i \left[t - \frac{(R + r(\vec{\rho}, \vec{R}))}{c} \right]}{r(\vec{\rho}, \vec{R})} \times \exp \left[j\omega_i \left(t - \frac{R + r(\vec{\rho}, \vec{R})}{c} \right) + j\vartheta_s \right] \right\}, \quad (5)$$

где $\dot{a} = a \exp(j\vartheta_s)$ – нормирующий множитель.

Следует учитывать, что соотношение (5) получено в предположении о постоянстве коэффициента усиления передающей антенны в рабочем секторе углов.

При появлении в зоне ответственности радиолокационной системы подвижной цели пространственно-временная картина поля в месте расположения приемных антенн существенно изменяется. Рассмотрим поле движущегося источника сигнала.

2. Модель поля движущейся цели. Поскольку объектом обнаружения является медленно движущаяся цель, например чело-

век в помещении или за стеной здания, то вполне допустимо предположение, что цель движется равномерно и прямолинейно со скоростью \vec{V} относительно области G , в которой расположена приемная система.

Рассмотрим две системы координат: $XYZt$, или (\vec{r}, t) – связанную с антенной, и $X'Y'Z't'$, или (\vec{r}', t') – связанную с целью. В качестве начального момента времени примем момент прихода сигнала в точку O . Если форма сигнала, отраженного целью, есть

$$\dot{s}_0(t') = \sum_{i=0}^M \dot{U}_i(t') \exp(j\omega_i t'), \quad (6)$$

то выражение для поля сферической волны, создаваемой сигналом (6), в системе отсчета, связанной с целью, будет иметь следующий вид:

$$\dot{u}(t', \vec{r}') = C_0 \sum_{i=0}^M \dot{s}_i \left(t' + R_1 (c - V_R)^{-1} - |\vec{r}'| c^{-1} \right) / |\vec{r}'|, \quad (7)$$

где C_0 – постоянная; R_1, V_R – дальность и радиальная скорость цели относительно точки O в момент $t = 0$.

В системе отсчета, связанной с антенной, поле (7) может быть записано как

$$\dot{u}(t, \vec{r}) = \frac{C_0}{|\vec{r} - \vec{V}t|} \dot{s}_0 \left(t - \frac{\vec{V}\vec{r}}{c^2} + \frac{R_1}{c + V_R} - \frac{|\vec{r} - \vec{V}t|}{c} \right). \quad (8)$$

Следует учесть, что расстояние, на которое перемещается цель за время обработки, как правило, намного меньше расстояния до цели, поэтому справедливо неравенство $r \gg Vt$ и член $|\vec{r} - \vec{V}t|$ в (8) можно представить в виде

$$|\vec{r} - \vec{V}t| = \sqrt{r^2 + (Vt)^2 - 2\vec{V}\vec{r}t} \approx r \left(1 - V_r t / r + V_{tr}^2 t^2 / 2r^2 \right), \quad (9)$$

где $V_r t, V_{tr} t$ – радиальное и тангенциальное перемещения цели за время обработки сигнала.

Поскольку цель «медленная», т. е. перемещение цели за время обработки мало по отношению к расстоянию до цели, то поле на раскрыве антенны от движущейся цели с учетом (9) можно записать как

$$\dot{u}(t, \vec{r}) \approx \frac{C_0}{r} \dot{s}_0 \left[\left(1 - \frac{V_r}{c} \right) \left(t - \frac{r}{c} \right) + \frac{R_1}{c + V_r} - \frac{V_r^2 t^2}{2cr} \right], \quad (10)$$

где $\dot{s}_0(t') = \sum_{i=0}^M \dot{U}_i(t') \exp(j\omega_i t')$, $r = r(\vec{\rho}, \vec{R})$ – рас-

стояние от цели до точки антенны в момент прихода сигнала в точку O ; $V_r = V_r(\vec{r})$ – радиальная составляющая скорости цели в точке с координатой \vec{r} .

Член, зависящий от тангенциальной компоненты скорости цели, необходимо учитывать лишь при большом времени обработки сигнала. Как следует из соотношения (10), вследствие эффекта Доплера изменяются не только несущая частота и начальная фаза каждой компоненты исходного спектра сигнала, но и комплексная огибающая поля. В частности, это касается ее длительности и ширины спектра. Однако, как показывают эксперименты с реальными целями, при тех значениях их скоростей, которые могут иметь место в реальной ситуации, и при типовых параметрах СШП сигналов, используемых для зондирования, искажениями комплексной огибающей за счет эффекта Доплера можно пренебречь. Тогда напряженность поля на раскрытие приемной антенной системы, обусловленную движущимся источником, можно описать выражением

$$\dot{u}(t, \vec{r}) \approx \frac{C_0}{r} \sum_{i=0}^M \dot{U}_i \left(t - \frac{r}{c} + \frac{R_1}{c + V_r} \right) \times \exp \left\{ j\omega_i \left[\left(1 - \frac{V_r}{c} \right) \left(t - \frac{r}{c} \right) + \frac{R_1}{c + V_r} - \frac{V_r^2 t^2}{2rc} \right] \right\}. \quad (11)$$

Суммарное поле от неподвижной и подвижной целей будет результатом суперпозиции (11) и (5).

Таким образом, селекция медленно движущейся цели на фоне интерференционной картины, создаваемой полем (5), состоит в вычитании из суммарного сигнала приемной системы поля, сформированного комплексом неподвижных отражателей. Этим достигается компенсация фоновых интерференционных отражений. Такая процедура допустима при соблюдении двух условий: 1) при выполнении соотношения $r \gg Vt$; 2) при отсутствии явно выраженных нелинейных искажений в приемниках системы наблюдения.

Второе условие в реальных условиях выполняется благодаря относительно малым расстояниям до обнаруживаемых объектов, которое составляет от единиц до десятков метров. Мощность сигнала передатчика относительно невелика, и перегрузка первых каскадов приемников отсутствует.

3. Алгоритм обнаружения подвижных целей за оптически непрозрачными препятствиями. Аппаратная часть системы наблюдения включает передающее устройство и два пространственно-разнесенных приемных пункта. Передатчик излучает зондирующий сигнал, формируя сферический фронт волны у цели, находящейся на расстояниях R_1 и R_2 от приемника 1 и приемника 2 соответственно. Развернутый во времени сигнал каждого из приемников представляет собой результат интерференции сигнала передатчика и отражений от множественных неподвижных целей, находящихся в помещении. На рис. 2 показана одна из реализаций сигнала каждого из приемников. Удаление фоновых отражений зондирующего сигнала от неподвижных предметов осуществляется путем поэлементного вычитания начальных строк из последующих сигналов каждого из приемников независимо друг от друга.

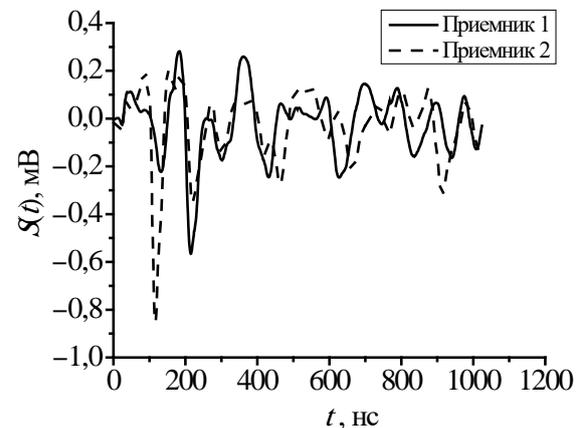


Рис. 2. Развертка отраженных сигналов во времени

В результате образуются два радиолокационных изображения подвижной цели (рис. 3, а, б), которые представлены в координатах «дальность» – «время наблюдения за целью». Номер строки в матрице, содержащей изображение, соответствует конкретной задержке сигнала при его распространении от передатчика до цели и обратно к прием-

нику 1 и приемнику 2 соответственно. Номер столбца показывает смещение цели в азимутальной плоскости относительно фазового центра антенны соответствующего приемника.

На приведенных изображениях отражены результаты следующего эксперимента. Цель (в эксперименте – человек) перемещалась от дальней точки помещения к месту расположения приемных антенн, а затем покидала зону ответственности РЛС и возвращалась обратно по той же траектории.

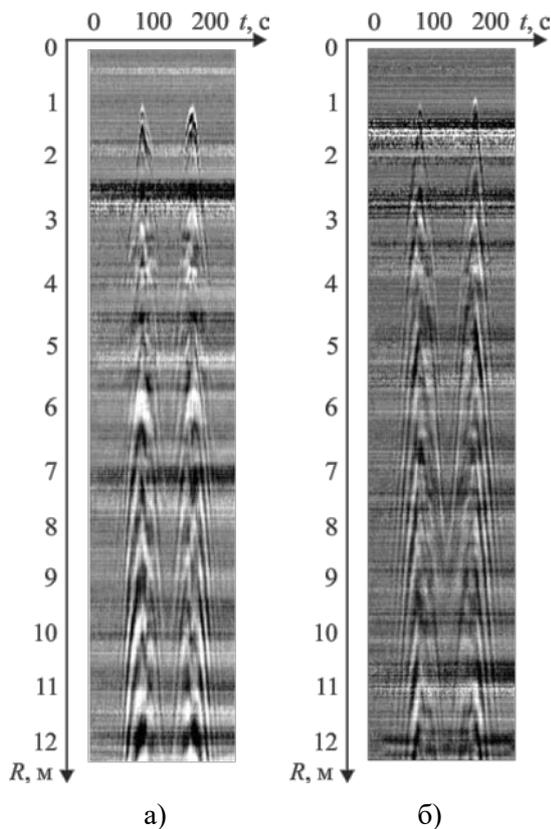


Рис. 3. Радиолокационное изображение цели, сформированное по сигналу приемника 1 (а) и приемника 2 (б)

Этим обусловлено появление на радиолокационных изображениях двух гипербол. Как следует из рис. 3, не все строки пригодны для измерений разности расстояний до подвижной цели. Это обусловлено наличием электромагнитных помех от внешних источников, неполной компенсацией отражений от местных неподвижных предметов и, возможно, частичной перегрузкой первых каскадов приемников.

Поскольку цель перемещается медленно относительно времени обработки каждой из строк по дальности, то, очевидно, нет необ-

ходимости использовать каждую строку для вычисления задержек (скорость цели – 0...5 м/с, а временной интервал между строками – меньше 100 нс). В силу этого обстоятельства для устойчивой и достоверной работы алгоритма был выбран критерий отбраковки строк по пик-фактору сигнала. Пик-фактор определяется как отношение максимальной мощности к средней, выраженное в децибелах, т. е.

$$Q = 10 \lg \left(P_{\max} / \int_0^T P(t) dt \right), \quad (12)$$

где P_{\max} и $P(t)$ — соответственно максимальная и мгновенная мощности на интервале наблюдения T .

Величина Q , необходимая для установления порога отбраковки поврежденных помехой строк, выбиралась на основе экспериментальных данных. Для примера на рис. 4, а и б показаны соответственно неповрежденные и поврежденные строки.

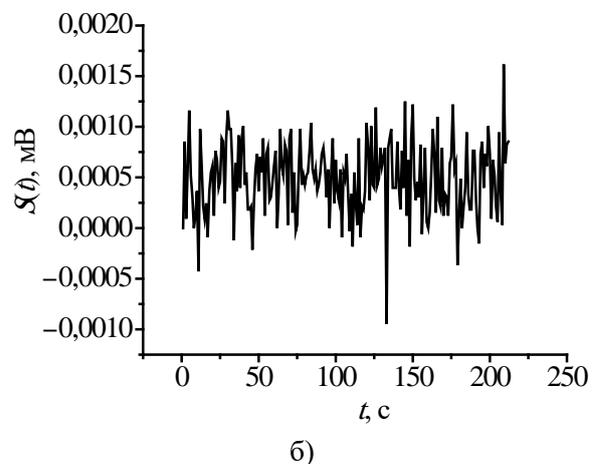
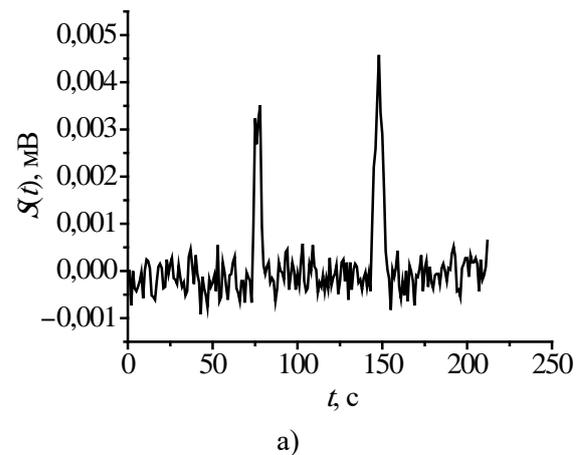


Рис. 4. Строка с пик-факторами $Q = 20$ дБ (а) и $Q = 5$ дБ (б)

Результат пороговой обработки информационных сигналов каждого приемника с учетом пик-фактора приведен на рис. 5. Конкретное значение порога для каждого эксперимента можно оценить путем анализа статистических свойств информационного сигнала.

Разность задержек сигналов, зарегистрированных приемником 1 и приемником 2, может быть вычислена как разность индексов по вертикальной оси при фиксированном азимутальном смещении. Как видно на рис. 5, из-за пропусков сигнала, обусловленных помехами, траектория перемещения искомого объекта не является сплошной гладкой линией, что затрудняет реализацию алгоритма автоматического отслеживания цели.

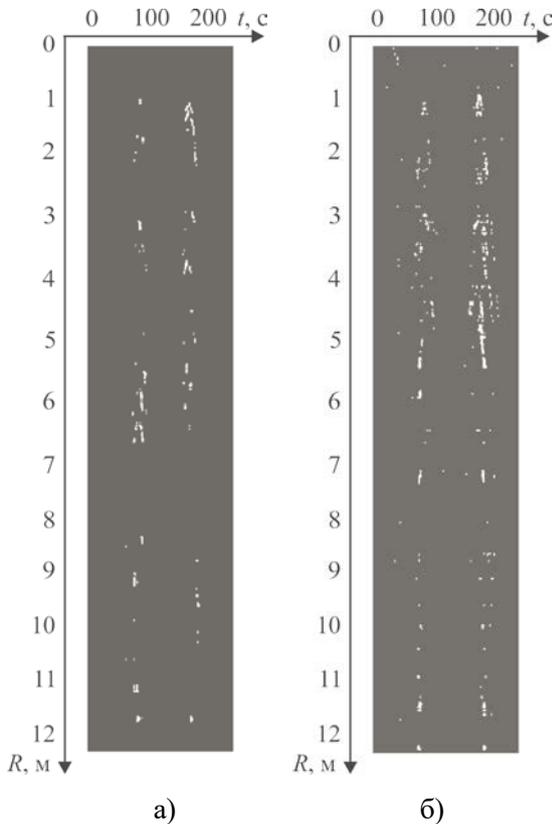


Рис. 5. Перемещение цели во времени и пространстве, сформированное по сигналом приемника 1 (а) и приемника 2 (б)

Поэтому, учитывая, что реальный объект не может изменять свое местоположение скачкообразно за время измерения, для сглаживания траектории применяется полиномиальное скользящее сглаживание с последующей сплайн-аппроксимацией. Результаты

работы этого алгоритма для сигналов, зарегистрированных каждым из приемников, показаны в виде кривых на рис. 6.

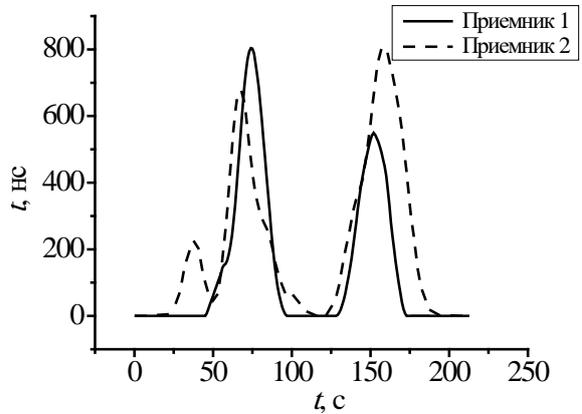


Рис. 6. Кривые для вычисления разности задержек сигналов от перемещающейся цели до приемников

На рис. 7 показана обобщенная структура алгоритма формирования и обработки информационного сигнала.

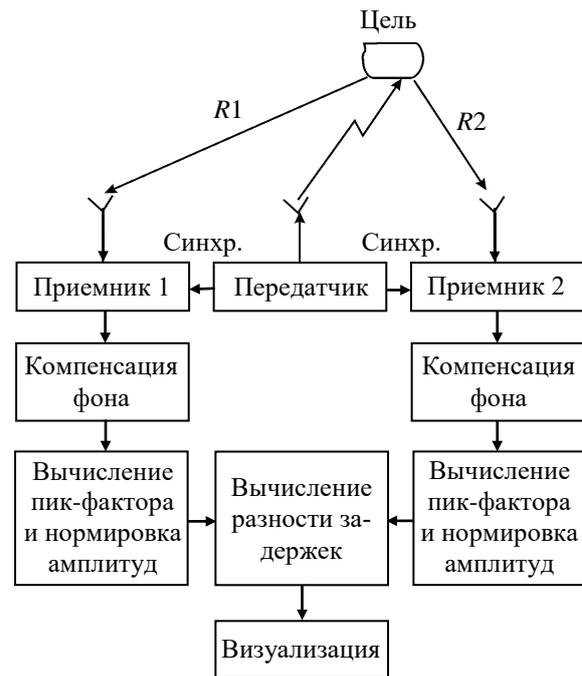


Рис. 7. Структура алгоритма обработки сигналов РЛС

4. Расчет координат цели по измеренным разностям задержек. Геометрия задачи определения дальности до цели в базово-корреляционной системе радиолокации, содержащей передатчик, расположенный в точке O , и два пространственно-разнесенных приемника, показана на рис. 8.

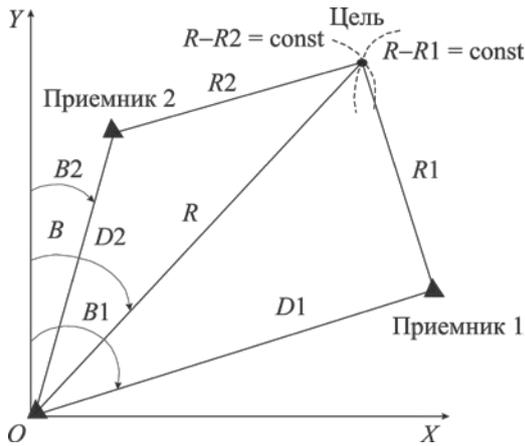


Рис. 8. Геометрия пространственно-разнесенной радиолокационной системы

На рис. 8 введены следующие обозначения: R – расстояние от передатчика до цели; R_1 – расстояние от приемника 1 до цели; R_2 – расстояние от приемника 2 до цели; D_1 – расстояние от передатчика до приемника 1; D_2 – расстояние от передатчика до приемника 2; B – угол между осью Y системы координат и направлением на цель от передатчика; B_1 – угол между осью Y системы координат и направлением на цель от приемника 1; B_2 – угол между осью Y системы координат и направлением на цель от приемника 2.

Согласно теореме косинусов, разность расстояний ΔR_1 может быть вычислена по формуле

$$\begin{aligned} \Delta R_1 &= R - R_1 = \\ &= R - \sqrt{R^2 - 2RD_1 \cos(B - B_1) + D_1^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Соответственно, разность расстояний ΔR_2 вычисляется как

$$\begin{aligned} \Delta R_2 &= R - R_2 = \\ &= R - \sqrt{R^2 - 2RD_2 \cos(B - B_2) + D_2^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Значения величин ΔR_1 и ΔR_2 определяются через измеренные задержки распространения сигнала τ_1 и τ_2 соответственно как $\Delta R_1 = c\tau_1$ и $\Delta R_2 = c\tau_2$. Величины баз (D_1 и D_2) и углы (B_1 и B_2) известны. Тогда выражения (13) и (14) образуют систему уравнений с двумя неизвестными R и B . Другими словами, система уравнений (13) и (14) позволяет вычислить расстояние от передатчика до цели и азимутальное направление на цель от передатчика.

Выводы. Таким образом, разработанный алгоритм для обнаружения и измерения координат малоподвижных целей, скрытых оптически непрозрачными препятствиями, является оптимальной реализацией новой идеи использования СШП-георадара для решения задач контроля помещений с ограниченным доступом, антитеррористических задач и задач спасения людей при техногенных и природных катастрофах. Радиолокационная система, формирующая информационный сигнал, строится по принципу базово-корреляционной РЛС, состоящей из импульсного передающего устройства и двух пространственно-разнесенных приемников. Измерение задержек сигналов, отраженных от цели, осуществляется в каждом из каналов приема отдельно относительно сигнала передатчика. При вычислении разности расстояний от приемников до цели расстояние от передатчика до цели не имеет значения, так как

$$\begin{aligned} \Delta R &= R_1 - R_2 = \\ &= (c(\tau_1 + \tau_0) - c(\tau_2 + \tau_0)) = c(\tau_1 - \tau_2), \end{aligned}$$

где τ_0 – задержка сигнала при его распространении от передатчика до цели; τ_1 – задержка сигнала при его распространении от цели до приемника 1; τ_2 – задержка сигнала при его распространении от цели до приемника 2.

Предложенный метод подавления фоновых отражений от неподвижных предметов и пороговой отбраковки поврежденных помехой строк позволил реализовать возможность непрерывного в реальном масштабе времени мониторинга состояния замкнутых помещений и обнаружения подвижных целей за оптически непрозрачными препятствиями. Экспериментально установлено, что при пороге $Q > 8$ дБ (12) вероятность появления ошибочных отметок составляет менее 0,05, а траектория перемещения цели отображается с достаточной для практических приложений точностью. Благодаря высокому потенциалу и стабильности параметров системы оказалось возможным использовать цифровую обработку сигналов в масштабе реального времени, что в перспективе открывает возможность существенного повышения точности измерений и детализации изображений при многоцелевой обстановке.

Библиографический список

1. Хармут Х. Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и связи: моногр. Москва: Радио и связь, 1985. 376 с.
2. Финкельштейн М. И., Кутев В. А., Золотарев В. П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии: моногр. Москва: Недра, 1986. 128 с.
3. Гринев А. Ю. Вопросы подповерхностной радиолокации: моногр. Москва: Радиотехника, 2005. 416 с.
4. Pochanin G. P. Some Advances in UWB GPR. In: *Unexploded Ordnance Detection and Mitigation. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*. Ed. by Jim Byrnes, Springer: Dordrecht, (The Netherlands), 2009. P. 223–233.
5. Pochanin G. P., Ruban V. P., Kholod P. V., Shuba A. A., Pochanin A. G., Orlenko A. A., Batrakov D. O., Batrakova A. G. GPR for pavement monitoring. *Journal of radio electronics*. 2013. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/alt/jan13/8/text.pdf>
6. Ruban V. P., Pochanin G. P. Sampling duration for noisy signal conversion. *Proc. of 5th Int. Conf. on "Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals"*. September 6–10, 2010, Sevastopol, Ukraine, pp. 275–277.
7. Sytnik O. V. Spectral Selection of Very-Low Frequencies Processes. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2009. Vol. 68, N 2. P. 137–144.
8. Сытник О. В., Вязьмитинов И. А., Мирошниченко Е. И. Статистические свойства спектральных оценок информационных сигналов при зондировании мало-подвижных объектов. *Физические основы приборостроения*. 2012. Т. 1, № 4. С. 78–85.
9. Sytnik O. V. Invariant Transformation in Identification Theory. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2003. Vol. 60, N 10, 11&12. P. 20-32.
10. Масалов С. А., Почанин Г. П. Проблемы и пути развития сверхширокополосной видеоимпульсной георадиолокации. *Радиофиз. и электроника: сб. науч. тр. Ин-т радиофиз. и электрон. НАН Украины*. Харьков, 2005. Т. 10, спец. вып. С. 633–640.
11. Taylor J. D. (ed.) *Ultrawideband Radar Applications and Design*. Boca Raton, London, New York. CRC Press, 2012. 536 p.
12. Pochanin G. P., Masalov S. A. Large Current Radiators: Problems, Analysis, and Design. In: *Ultrawideband Radar Applications and Design*. Ed. by J. D. Taylor. Boca Raton, London, New York. CRC Press, 2012. P. 325–372.
13. Taylor J. D. (ed.) *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications*. CRC Press, 2016. 475 p.
14. Pochanin G. P., Masalov S. A., Ruban V. P., Kholod P.V., Batrakov D. O., Batrakova A. G., Varianitsia-Roshchupkina L. A., Urdzik S. N., Pochanin O. G. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying. In: *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications*. Ed. by J. D. Taylor. CRC Press, 2016. P. 19–64.
15. Sytnik O. V., Masalov S. A., Pochanin G. P. Homomorphic Signal Processing Algorithm of Ground Pene-

tration Radar. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2016. Vol. 75, N 5. P. 413–423.

REFERENCES

1. Harmut, X. F., 1985. *Nonsinusoidal Waves in Radar and Communications*. Moscow: Radio and Svyaz' Publ. (in Russian).
2. Finkelshteyn, M. I., 1986. *The use of radar subsurface sounding in engineering geology*. Moscow: Nedra Publ. (in Russian).
3. Griniev, A. U., 2005. *Sub-surface radar issues*. Moscow: Radiotekhnika Publ. (in Russian).
4. Pochanin, G. P., 2009. Some Advances in UWB GPR. "Unexploded Ordnance Detection and Mitigation". *NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*. Ed. by Jim Byrnes, Springer: Dordrecht, (The Netherlands), pp. 223–233.
5. Pochanin, G. P., Ruban, V. P., Kholod, P. V., Shuba, A. A., Pochanin, A. G., Orlenko, A. A., Batrakov, D. O., Batrakova, A. G., 2013. GPR for pavement monitoring. *Journal of radio electronics*. [online] 1. Available from: <http://jre.cplire.ru/alt/jan13/8/text.pdf>
6. Ruban, V. P., Pochanin, G. P., 2010. Sampling duration for noisy signal conversion. In: *Proc. of 5th Int. Conf. on "Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals"*. Sevastopol, Ukraine, Sept. 6–10, pp. 275–277.
7. Sytnik, O. V., 2009. Spectral Selection of Very-Low Frequencies Processes. *Telecommunications and Radio Engineering*, **68**(2), pp. 137–144.
8. Sytnik, O. V., Vyzmitinov, I. A., Myroshnichenko, Ye. I., 2012. Statistical properties of spectral estimates of information signals when probing small objects. *Fizicheskie Osnovy Priborostroyeniya*, **1**(4), pp. 78–85 (in Russian).
9. Sytnik, O. V., 2003. Invariant Transformation in Identification Theory. *Telecommunications and Radio Engineering*, **60**(10, 11&12), pp. 20-32.
10. Masalov, S. A., Pochanin, G. P., 2005. Problems and ways of development of ultra-wideband video-pulse georadiolocation. In: V. M. Yakovenko, ed. 2005. *Radiofizika i Elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **10**(spec. iss.), pp. 633–640 (in Russian).
11. Taylor, J. D., 2012. *Ultrawideband Radar Applications and Design*. Boca Raton, London, New York. CRC Press. 536 p.
12. Pochanin, G. P., Masalov, S. A., 2012. Large Current Radiators: Problems, Analysis, and Design. In: *Ultrawideband Radar Applications and Design*. Ed. by J. D. Taylor. Boca Raton, London, New York. CRC Press, pp. 325–372.
13. Taylor, J. D., 2016. *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications*. CRC Press, 475 p.
14. Pochanin, G. P., Masalov, S. A., Ruban, V. P., Kholod, P. V., Batrakov, D. O., Batrakova, A. G., Varianitsia-Roshchupkina, L.A., Urdzik, S. N., Pochanin, O. G., 2016. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying. In: *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications*. Ed. by J. D. Taylor. CRC Press, pp. 19–64.
15. Sytnik, O. V., Masalov, S. A., Pochanin, G. P., 2016. Homomorphic Signal Processing Algorithm of Ground

Penetration Radar. *Telecommunications and Radio Engineering*, 75(5), pp. 413–423.

Рукопись поступила 05.03.2018.

O. V. Sytnik, G. P. Pochanin, S. A. Masalov,
V. P. Ruban, P. V. Kholod

METHOD FOR MEASUREMENT OF MOBILE OBJECTS COORDINATES BY VIDEO-PULSE RADAR

Subject and Purpose. The subject of the study is a measuring system consisting of several spatially separated receiving points and a transmitter emitting video pulse signals. The aim of the work is to create an effective algorithm for processing signals from a multi-position observation system under conditions of correlated jamming to solve the problem of the operational detection of mobile objects hidden behind optically opaque obstacles.

Methods and methodology of work are based on the difference-distance-measuring principle of calculation of the target coordinates. The informative signal from the target is not identified by direct methods because of the multiple reflections of the sounding signal from the walls of the room and objects located inside it. The procedure for suppressing the interference reflections of the probing signal is developed. The accumulation of a signal and the removal of interference is carried out in real time by subtracting the alternating samples of the observed process from the signals of each receiving point assuming that the object is slow moving or practically unmoving during the time of sounding signal propagation from transmitter to target and back. The delay of the probing signal during its propagation from the transmitter to the target and from the target to each of the receivers has been estimated using the proposed peak factor criterion. The same criterion is used to reject the struck lines on the radar image of the target's trajectory.

Results. A high-speed algorithm is developed which, at the condition of a relatively high signal-to-noise ratio, makes it possible to use the signal peak factor as a criterion for jammers suppression at the radar's image. The simplicity of signal processing allowed to continuously display the data in a user-friendly form. The continuity of measurements of the delays of the reflected signals from the target to the receiving points is ensured by polynomial approximation of the object trajectories relative to each of the receivers.

Conclusions. The high energy characteristics of the observation system, the stability of the parameters during the measurements, and the high accuracy of the reflected waveform reproduction allowed us to use digital signal processing methods in real time. The simulation results are confirmed by data that were accumulated and averaged over a series of similar experiments.

Key words: radar, ultra-wideband signal, peak-factor, video pulse, algorithm, alternating samples, spatially separated receiving system.

О. В. Ситник, Г. П. Почанин, С. О. Масалов,
В. П. Рубан, П. В. Холод

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ ВІДЕОІМПУЛЬСНИМ РАДАРІМ

Предмет і мета роботи. Предметом дослідження є вимірвальна система, що складається з декількох просторово-рознесених приймальних пунктів і передавача, який випромінює відеоімпульсні сигнали. Метою роботи є створення ефективного алгоритму обробки сигналів багатопозиційної системи спостереження в умовах корельованих завад для розв'язання задачі оперативного виявлення рухомих об'єктів, прихованих за оптично непрозорими перешкодами.

Методи і методологія роботи засновані на різницево-далекомірному принципі вимірювання координат цілі. Через численні перевідбиття зондувального сигналу від стін приміщення і розташованих усередині його предметів корисний сигнал від цілі не ідентифікується прямими методами. Розроблено процедуру придушення інтерференційних відбиттів зондувального сигналу. Накопичення сигналу і видалення з нього шумових завад здійснюється у реальному масштабі часу шляхом обчислення черезперіодних виборок спостережуваного процесу з сигналів кожного приймального пункту в припущенні про малість зміщення об'єкта за час локального зондування. В якості критерію оцінки тривалості затримки зондувального сигналу при його поширенні від передавача до цілі і від цілі до кожного з приймачів обрано величину пік-фактора сигналу. Той самий критерій використовується для відбракування уражених завадами рядків на радіолокаційному зображенні траєкторії цілі.

Результати роботи. Розроблено швидкодіючий алгоритм, який при порівняно високому відношенні сигнал/шум дозволяє використовувати пік-фактор сигналу в якості критерію відбракування уражених завадою рядків радіолокаційного зображення і здійснювати безперервне оброблення сигналів системи спостереження з відображенням даних у зручному для користувача вигляді. Безперервність вимірювань різниць затримок відбитого від цілі сигналу до приймальних пунктів забезпечується поліноміальною апроксимацією траєкторій переміщення об'єкта щодо кожного з приймачів.

Висновки. Високі енергетичні характеристики системи спостереження, стабільність параметрів у процесі вимірювань, висока точність відтворення форми відбитого сигналу дозволяють використовувати методи цифрового оброблення сигналів у реальному часі. Результати моделювання підтверджені даними, які накопичувалися і усереднювалися за серією однотипних експериментів.

Ключові слова: радіолокаційна станція, надширокопasmовий сигнал, пік-фактор, відеоімпульс, алгоритм, черезперіодні вибірки, просторово-рознесена приймальна система.