

ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОЧАСТОТНОЙ МУЛЬТИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Науен Хоанг Хиеп, магистрант гр. 545301

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Козлов С.В. – доктор техн. наук

Аннотация. В статье рассматривается функционирование многочастотной мультистатической радиоголографической системы обнаружения подповерхностных объектов с размещением аппаратуры на беспилотном летательном аппарате. Рассмотрен способ учёта характеристик укрывающей среды (грунта): ослабления амплитуды и изменения фазы электромагнитной волны при распространении в грунте. Приведены результаты имитационного моделирования РЛИ одиночного подповерхностного объекта при различных параметрах грунта.

Ключевые слова. радиоголография, мультистатическая система, метод обратных проекций, подповерхностная радиолокация, многочастотный сигнал, укрывающая среда, РЛИ.

Введение

Задача обнаружения скрытых объектов актуальна для многих прикладных областей: от неразрушающего контроля строительных конструкций до гуманитарного разминирования. Поскольку традиционные георадары часто не обеспечивают необходимого пространственного разрешения и производительности (площади исследуемой территории), перспективным решением является применение многочастотных мультистатических радиоголографических систем с размещением аппаратуры на беспилотном летательном аппарате (БЛА). Использование большого числа пространственно-разнесенных приемных позиций в сочетании с набором зондирующих частот позволяет формировать высокодетальные трехмерные радиоизображения скрытых сцен.

Качество восстановления таких изображений критически зависит от влияния укрывающей среды. Грунт представляет собой дисперсную среду с потерями, в которой сигнал подвергается частотно-зависимому затуханию и фазовым искажениям. Отсутствие учета этих факторов приводит к расфокусировке формируемого радиолокационного изображения (РЛИ) и ошибкам в определении глубины залегания цели. Помимо этого, при наклонном зондировании луч испытывает преломление на границе «воздух–грунт», что изменяет геометрию трассы распространения для каждой пары «позиция БЛА — объект».

Цель статьи — разработка принципа функционирования многочастотной мультистатической радиоголографической системы и исследование алгоритма построения РЛИ с корректным учётом геометрии распространения и электрофизических характеристик укрывающей среды.

Принцип функционирования системы

Рассматриваемая радиоголографическая система является аналогом радиолокатора с синтезированием апертуры (РСА), но синтез выполняется не для одного участка синтезирования, а для нескольких произвольным образом расположенных друг к другу участков. Пусть передающая антенна последовательно занимает положения в узлах двумерной сетки размером $I \times J$ с шагами Δx и Δy в плоскости сканирования на высоте z_0 относительно земной поверхности. На каждой позиции излучается когерентный зондирующий сигнал на L несущих частотах f_l , $l = 1, \dots, L$, равномерно расположенных в полосе Δf (рисунок 1). Приёмная антенна регистрирует комплексную амплитуду рассеянного сигнала $V = (i, j, l)$ для каждой позиции (i, j) и каждой частоты f_l . Совокупность таких отсчётов образует многочастотную радиоголограмму.

Объект наблюдения расположен на глубине z_m под поверхностью грунта. Вектор координат цели в пространстве обозначим $\mathbf{r}_m = (x_m, y_m, z_m)^T$, где $z_m < 0$ (ниже поверхности трасса). Трасса распространения электромагнитной волны (ЭМВ) от БЛА до объекта и обратно проходит через два участка: воздух (от антенны БЛА до поверхности грунта) и грунт (от поверхности грунта до объекта). Именно этим определяется специфика данной системы по сравнению с обычной мультистатической радиоголографической системой [2].

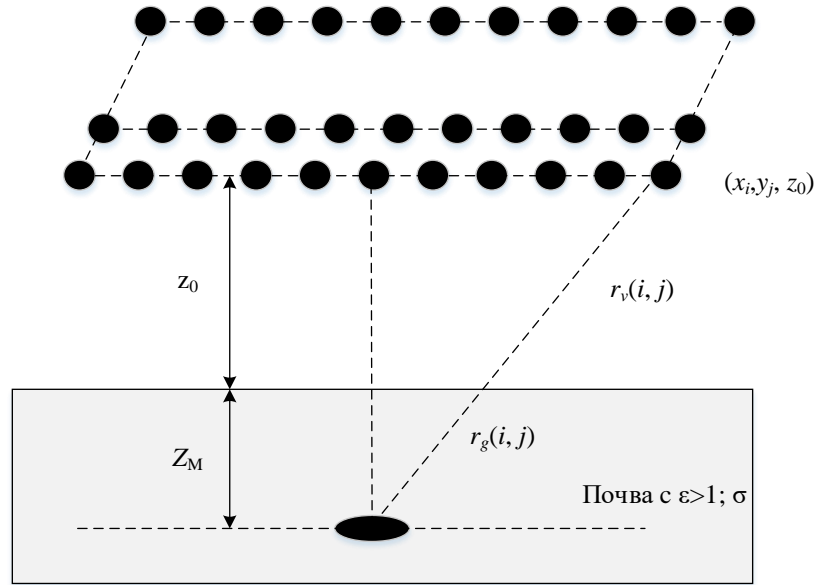


Рисунок 1 – Геометрия радиолокационного наблюдения

Алгоритм построения радиолокационного изображения

Восстановление РЛИ осуществляется методом суммы обратных проекций [1, 3, 4]. Радиолокационное изображение объекта (РЛИ) в грунте формируется как модуль комплексного корреляционного интеграла $Q(\mathbf{r}_0)$ для каждой точки \mathbf{r}_0 пространства:

$$Q(\mathbf{r}_0) = \sum_{\ell=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \dot{V}(i, j, \ell) \cdot H_{\text{он}}^*(i, j, \ell | \mathbf{r}_0) \quad (1)$$

где $H_{\text{он}}(i, j, \ell | \mathbf{r}_0)$ – опорный (ожидаемый) сигнал при нахождении объекта в точке \mathbf{r}_0 .

Выбирая из полученного трехмерного массива сечения для разной глубины, получим РЛИ объекта для различных глубин его залегания.

Одночастотному случаю соответствует $L=1$. При $L > 1$ многочастотная когерентная обработка позволяет получать трёхмерное РЛИ и улучшать разрешение по глубине [5].

Учёт характеристик грунта

Электромагнитные свойства почвы на частоте зондирования описываются комплексной относительной диэлектрической проницаемостью $\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$. Действительная часть ϵ' определяет скорость распространения радиоволны в среде, а мнимая часть $\epsilon'' = \frac{\sigma_n}{2\pi f \epsilon_0}$ (σ_n — удельная проводимость грунта, ϵ_0 — электрическая постоянная) характеризует поглощение энергии электромагнитного поля. На основе этих параметров для каждой рабочей частоты вычисляется комплексная постоянная распространения [5]:

$$\dot{\gamma}(f) = i \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\hat{\epsilon}} = i \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon' - i \frac{\sigma_n}{2\pi f \epsilon_0}} = \alpha(f) + i \cdot \beta(f) \quad (2)$$

где $\alpha(f)$ — коэффициент ослабления по амплитуде, $\beta(f)$ — коэффициент фазы, c — скорость света в вакууме.

Расчёт $\dot{\gamma}(f)$ производится предварительно для каждого типа укрывающих сред согласно [5] и таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики основных укрывающих сред

Укрывающая среда	Электромагнитные характеристики (статика)		
	ϵ'	μ	$\sigma_n, \text{См/м}$
Сухой песок	4	1	10^{-4}
Грунт средней влажности	10	1	10^{-2}
Влажный суглинок	20	1	10^{-1}
Пресная вода	80	1	10^{-2}
Вода морская	80	1	4
Снег сухой	3 – 8	1	$\approx 10^{-5} - 10^{-7}$
Снег влажный	73 – 85	1	0,1

Данные таблицы 1 показывают, что затухание сигнала существенно зависит от типа грунта. Во влажном суглинке потери на частоте 1 ГГц составляют около 6 дБ/м, что при двукратном прохождении трассы (туда и обратно) ограничивает максимальную глубину обнаружения на уровне 20–30 см для типичного энергетического потенциала радиолокационной системы. В сухом песке глубина обнаружения может достигать 1–2 м [5].

Поскольку БЛА располагается не непосредственно над целью, в идеальных условиях (без учета влияния грунта) направление на цель определялось бы геометрическим углом θ . Однако из-за преломления на границе раздела сред луч падает на поверхность под углом α к нормали, а в грунте распространяется под углом β к нормали. Учитывая, что глубина залегания цели много меньше высоты полета БЛА $h_g \ll h_a$, в качестве допустимого приближения принимается $\alpha \approx \theta$. Таким образом, угол падения α вычисляется исходя из геометрии угла θ .

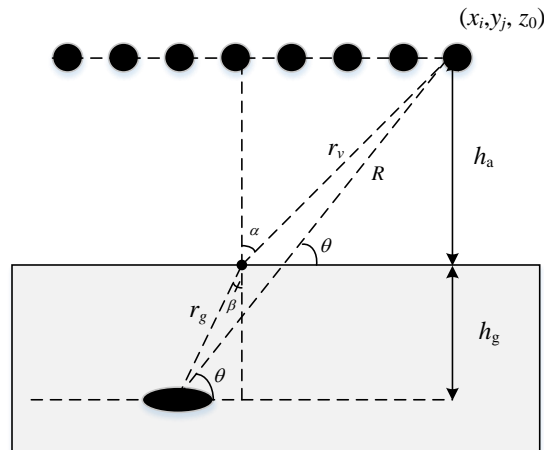


Рисунок 2 – Геометрия распространения сигнала на границе раздела воздух–грунт

Угол падения α (от нормали к поверхности) определяется непосредственно из геометрии (рисунок 2):

$$\sin \alpha \approx \sin \theta = \frac{h_a + h_g}{R}$$

$$\alpha = \arcsin \frac{h_a + h_g}{R} \tag{3}$$

Угол преломления β в грунте определяется законом Снеллиуса (показатели преломления $n_1=1$ и $n_2 = \sqrt{\epsilon'}$):

$$\sin \alpha = \sqrt{\epsilon'} \cdot \sin \beta$$

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{\sqrt{\varepsilon'}} = \frac{h_a + h_g}{R\sqrt{\varepsilon'}}$$

$$\beta = \arcsin \frac{h_a + h_g}{R\sqrt{\varepsilon'}} \quad (4)$$

Зная углы α и β , длины участков распространения в каждой среде вычисляются следующим образом:

$$r_g = \frac{h_g}{\cos \beta} = \frac{h_g}{\cos \left(\arcsin \frac{h_a + h_g}{R\sqrt{\varepsilon'}} \right)} \text{ — длина пути в грунте;}$$

$$r_v = \frac{h_a}{\sin \alpha} \text{ — длина пути в воздухе.}$$

Амплитуда опорного сигнала при согласованной фильтрации (когерентном накоплении) определяется выражением, учитывающим ослабление сигнала для различных приемных позиций и частот:

$$\dot{H}_{\text{он}}(i, j, \ell | \mathbf{r}_0) = \frac{1}{(r_v(i, j) + r_g(i, j))^2} \cdot e^{-\alpha(f) \cdot 2 \cdot r_g(i, j)} \quad (5)$$

Фаза сигнала, накопленная вдоль всей трассы, составляет:

$$\varphi(i, j, f) = \frac{2\pi f}{c} \cdot 2r_v + \beta(f) \cdot 2 \cdot r_g \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) полностью описывают амплитудно-фазовые характеристики принятого сигнала с учётом свойств укрывающей среды и используются при формировании опорной функции при когерентном накоплении сигнала и построении РЛИ.

Пример построения РЛИ

Для проверки разработанной математической модели и оценки эффективности предложенного способа влияния укрывающей среды было проведено вычислительное моделирование процесса зондирования в среде *Python*. Параметры системы: шаг сканирования (шаг расположения позиций БЛА) 5 см; высота БЛА над поверхностью 50 м; диапазон частот — $1 \dots 1,5 \text{ ГГц}$; число независимых частот 21. Рассматривался грунт средней влажности ($\varepsilon' = 10$, $\sigma_n = 10^{-2} \text{ См/м}$). Глубина залегания объекта принималась равной $z_m = 20$ см.

При использовании стандартного алгоритма фокусировки, предполагающего распространение волн в однородном свободном пространстве, полученное РЛИ (рисунок 3) характеризуется критическими искажениями. Наблюдается сильная пространственная расфокусировка: энергия рассеянного сигнала размазывается по большой площади, а объект не определяется. Кроме того, из-за замедления скорости волны в грунте, кажущаяся глубина залегания объекта на синтезированном изображении существенно превышает истинную, что делает невозможным точную локализацию цели.

При использовании алгоритма с учёта характеристик грунта, качество изображения радикально улучшается (рисунок 4). На результирующем РЛИ одиночный объект фокусируется в виде четкого, ярко выраженного пространственного максимума интенсивности. Геометрические координаты энергетического пика строго соответствуют истинному положению объекта. Благодаря использованию малого шага дискретизации пространственной сетки, фон вокруг объекта остается чистым, а побочные лепестки практически отсутствуют.

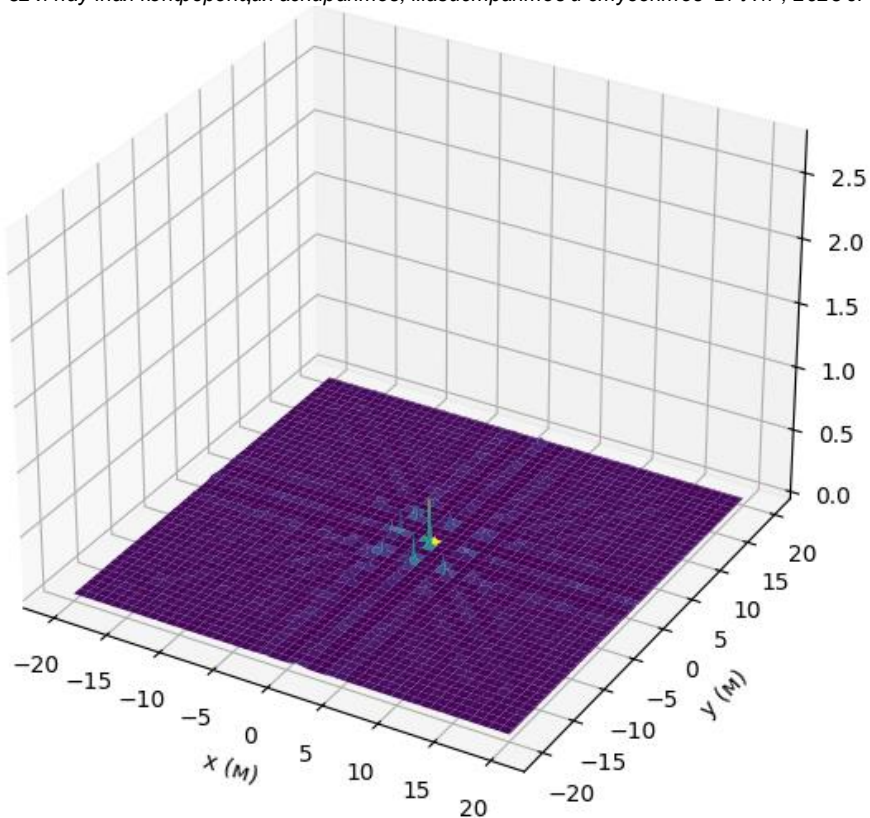


Рисунок 3 – РЛИ объекта без учета влияния грунта

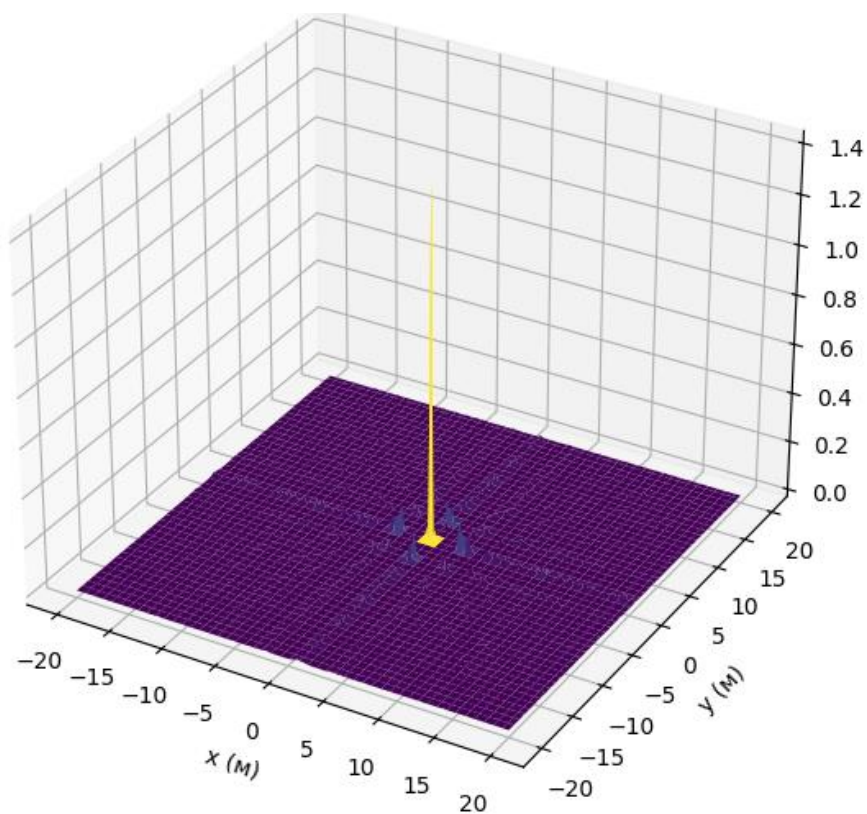


Рисунок 4 – РЛИ объекта с компенсацией влияния грунта

Результаты моделирования подтверждают, что разработанная математическая модель адекватно описывает физические процессы при радиологرافии объектов в слоистых средах с потерями.

Заключение

В работе предложена и исследована многочастотная мультистатическая радиоголографическая система обнаружения подповерхностных объектов. Сформулирован принцип функционирования системы на основе двумерного сканирования антенны и регистрации многочастотной радиоголограммы. Разработан алгоритм восстановления РЛИ методом суммы обратных проекций с корректным разбиением трассы на участки в воздухе и грунте. Предложен способ учёта электрофизических характеристик грунта, обеспечивающий коррекцию амплитуды и фазы сигнала для каждого угла наблюдения и каждой частоты.

Список использованных источников:

1. Крайний В. И., Семёнов А. Н., Чапурский В. В, Фокусировка многочастотных мультистатических радиоголограмм методом неэквидистантного БПФ – Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 11. С. 292–300.
2. Крайний В. И., Семёнов А. Н., Построение радиоизображений трёхмерных объектов с использованием многочастотной мультистатической радиоголограммы // Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 05. С. 1–10.
3. Разевиг В. В. Моделирование процесса регистрации радиоголограмм объектов сложной формы радиолокаторами малой и сверхмалой дальности – Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 6. С. 336–353.
4. Крайний В. И., Семёнов А. Н., Результаты фокусировки радиоизображений объемных объектов по многочастотной мультистатической радиоголограмме методом обратных проекций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 6. С. 31–40.
5. Николаев А. В. Влияние укрывающей среды на глубину зондирования в нелинейно-параметрической локации // Спецтехника и связь. — 2011. — № 1. С. 26–32.

UDC 621.396.96

OPERATING PRINCIPLES OF A MULTI-FREQUENCY MULTI-STATIC RADIOHOLOGRAPHIC SYSTEM FOR SUBSURFACE OBJECT DETECTION

Nguyen Hoang Hiep¹

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics¹, Minsk, Republic of Belarus

Kozlov S.V. – Doctor of Technical Science

Annotation. The article considers the operation of a multi-frequency multistatic radio-holographic system for subsurface object detection, with the equipment mounted on an unmanned aerial vehicle (UAV). A method for accounting for the characteristics of the obscuring medium (soil) is considered, specifically focusing on amplitude attenuation and phase shift of electromagnetic waves during propagation in the ground. The results of simulation modeling for the radar imaging of a single subsurface object under various soil parameters are presented.

Keywords. radio holography, multistatic system, back-projection method, subsurface radar, multi-frequency signal, covering medium, radar image.