



НАБЛЮДЕНИЕ ОБЪЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОДСТИЛАЮЩИХ СРЕД В УСЛОВИИ НЕЛИНЕЙНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Н. С. Вернигоров

директор ООО «Вихрь», д.т.н., профессор, лауреат премии Совмина СССР

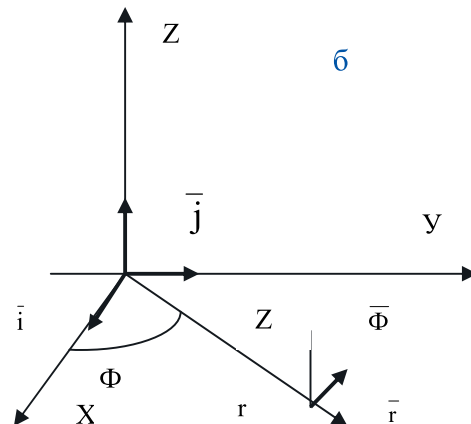
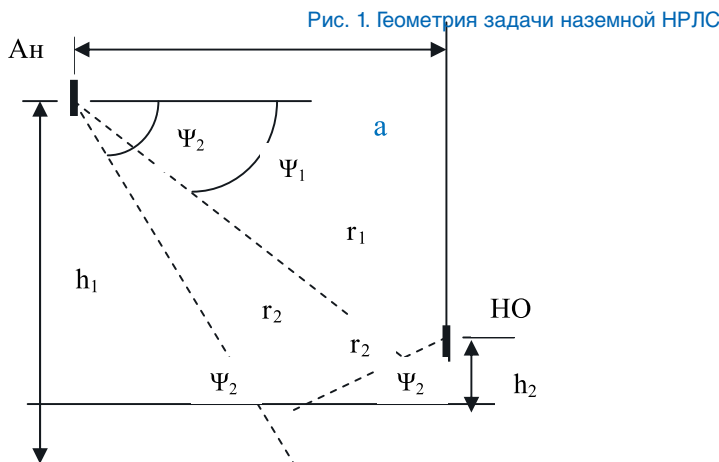
➤ Для наземной нелинейной радиолокации (НРЛ) при расположении электрически нелинейного объекта (ЭНО) вблизи над поверхностью подстилающей среды известно уравнение для определения нелинейно-рассеянных полей. Это уравнение решается методом геометрической оптики в приближении Релея ($\lambda \gg l$, где λ – длина волны зондирующего сигнала (ЗС); l – наибольший геометрический размер объекта) без учета фазовременных искажений ЗС на нелинейном элементе (НЭ) и поверхностной волны Нортонна [1]. В то же время для решения задач наземной радиолокации традиционным способом в [2] предложена методика геометрической оптики с учетом поверхностной волны Нортонна (также в приближении Релея без учета диаграммных свойств объекта).

Относительно вклада поверхностной волны следует отметить, что он наиболее значителен в диапазоне длинных и средних волн [1, 3] и может несколько возрастать лишь на определенных участках высокочастотного диапазона. Кроме того, при угле падения $\Psi < \Psi_N$ (где Ψ_N – предельный угол Нортонна) в приближении геометрической оптики уже не обеспечивается точность получаемых результатов. Величина Ψ_N определяется в основном частотой, поэтому в каждом конкретном случае необходимо проводить оценку существенности вклада поверхностных волн, особенно в СВЧ-диапазоне.

В задачах наземной НРЛ для целей наблюдения малоразмерных объектов длина волны ЗС соизмерима с характерными размерами объектов. Вследствие этого известные методы наблюдения оказываются малоэффективными. В нашем случае задача формулируется следующим образом. На ЭНО конечных размеров (тело вращения конечных размеров, в том числе вибратор, нагруженный на НЭ), размещенный на некоторой высоте над поверхностью подстилающей среды, падает плоская зондирующая волна заданной поляризации, состоящая из суммы колебаний на нескольких частотах с ω_N^{nab} , где N – значение частоты. Требуется определить составляющую нелинейно-рассеянного поля в точке наблюдения в зависимости от условий зондирования, электрофизических свойств подстилающей среды, типа нелинейности объекта с учетом фазовременных задержек при нелинейном преобразовании ЗС, а также построить обобщенное уравнение радиолокационного наблюдения для наземной НРЛ малоразмерных объектов.

Задача решается методом геометрической оптики с учетом поверхностной волны, при этом, нелинейность моделируется либо точечной, расположенной в центре объекта, либо распределенной по всей поверхности. Примем допущение, что расстояние от приемника до объекта $r \gg l, \lambda$, а особенности приемоизлучающих антенн учитываются диаграммой направленности.

Геометрия задачи изображена на рис. 1.



Излученное антенной поле можно записать в виде

$$\sum \vec{E}_{изл.}^{\omega_{изл.} N} = \sum \left(\sqrt{Z_{св.} P_{подв.}^{\omega_{изл.} N}} \right) \vec{F}_{изл.}(\theta), \quad (1)$$

где $P_{подв.}^{\omega_{изл.} N}$ – мощность, подводимая к антенне НРЛС на частоте ω_N^{nad} ;

$Z_{св.}$ – импеданс свободного пространства;

$\vec{F}_{изл.}(\theta)$ учитывает характеристики передающей антенной системы.

Тогда в соответствии с рис. 1 на объект падает поле, которое можно записать в виде

$$\sum_N \vec{E}_{изл.}^{\omega_{изл.} N} = \sum_N \left\{ \frac{\left(\sqrt{Z_{св.} \sum_N P_{подв.}^{\omega_{изл.} N}} \right) \vec{F}(\theta)}{r} [\cos^3 \psi_1 \exp(j2\pi r_1 / \lambda_N) + R_i \cos^3 \psi_2, \right. \quad (2)$$

• $\exp(j2\pi r_2 / \lambda_N) + (1 - R_i) f_N(P, B) \cos^2 \psi_2 \exp(j2\pi r_2 / \lambda_N + \Phi)] \}$

где R_i – коэффициент отражения от подстилающей поверхности на частоте ω_N^{nad} , учитывающий поляризацию i -й волны. Третий член суммы описывает вклад поверхностной волны по Нортону [1], откуда

$$f_N(P, B) e^{i\phi} = 1 + i(\sqrt{\pi P_1}) e^{-P_1} \operatorname{erfc}(-i\sqrt{P_1}), \quad (3)$$

$$P_1 = 4P e^{iB} / (1 - R_i)^2$$

где P и B – приведенные высоты антенн и объекта.

В результате взаимодействия \vec{E}_{nad} с ЭНО рассеянное поле приобретает вид

$$\vec{E}_{рас.} = L \sum_N \vec{E}_{над.}^{\omega_{изл.} N}, \quad (4)$$

где L – функционал нелинейного преобразования, который при наличии гармоник не выше третьего порядка имеет вид

$$L(E) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n E_{над.}^{\omega_{изл.} N}, \quad (5)$$

и представляет собой известное разложение нелинейной величины полным рядом Тейлора для малых возмущающих полей, где a_n – коэффициенты ряда; E – амплитуда внешнего поля.

При одночастотном зондировании

$$\vec{E}_{рас.} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \left| \vec{E}_{над.} \right|_n e^{j\varphi_n} \vec{P}_n, \quad (6)$$

где n – номер гармоники; B_n – коэффициент нелинейного амплитудного преобразования ЗС на ЭНО; φ_n – фазовая задержка на НЭ; \vec{P}_n – поляризационный множитель, определяемый эквивалентной антенной ЭНО на n -й гармонике.

В случае многочастотного ЗС поле $\vec{E}_{рас.}$ представляет собой совокупность колебаний на частотах вида [4]

$$\omega_k = \sum_{j=1}^l \sum_n m_n \omega_N \quad \text{причем} \quad \sum_n m_n = j \quad (7)$$

Таким образом, на вход приемной антенны поступает сигнал $\vec{E}_{np.}$, связанный с $\vec{E}_{рас.}$ соотношением (2), а принимаемая мощность на фиксированной гармонике определяется соотношением

$$P_{np.} = \frac{\left| \vec{E}_{np.} \right|^2}{Z_{св.}} \left| \vec{F}_{np.}(\theta) \right|^2, \quad (8)$$

где $\vec{F}_{np.}(\theta)$ учитывает характеристики приемной антенны.

Обобщая (1) и (8), запишем уравнение НРЛ в виде

$$P_{нпр.} = \frac{|F_{нпр.}(\theta)|^2}{Z_{св.} r^2} \left[\cos^3 \psi_1 \cdot \exp(j2\pi r_1 / \lambda_n) + R_n \cos^3 \psi_2 \cdot \exp(j2\pi r_2 / \lambda_n) + (1 - R_n) f_n(P, B) \right. \\ \left. \cdot \cos^2 \psi_2 \cdot \exp(j2\pi r_2 / \lambda_n + \Phi) \right] \cdot L \left\{ \left[\frac{\sqrt{Z_{св.} \sum_N P_{подв.}^{\omega_{изл.}}}}{r} F(\theta) \right] \cos^3 \psi_1 \exp(j2\pi r_1 / \lambda_i) \right. \\ \left. + R_i \cos^3 \psi_2 \cdot \exp(j2\pi r_2 / \lambda_i) + (1 - R_i) f_i(P, B) \cos^2 \psi_2 \exp(j2\pi r_2 / \lambda_i + \Phi) \right\}, \quad (9)$$

где индекс (n) означает принадлежность к n-й гармонике рассеянного сигнала, а (i) – i-й частоте ЗС.

Соотношение (9) является обобщенным уравнением наземной НРЛ. Оно позволяет установить закономерности изменения мощности на фиксированной гармонике нелинейного рассеяния при многочастотном ЗС в зависимости от различных условий зондирования: дальности, высоты расположения приемно-излучающих антенн и объекта, характеристик подстилающей среды (ϵ, σ) и подводимой мощности. Получение явной зависимости принимаемой мощности от множества переменных параметров, включая свойства переходов различных типов, не представляется возможным.

С помощью интерференционного уравнения НРЛ (9) проведено численное исследование влияния наиболее важных условий зондирования на дальность обнаружения ЭНО при одно- и двухчастотном зондировании. За максимальную дальность обнаружения принималось расстояние от НРЛС до ЭНО, соответствующее предельной чувствительности приемника. Она ограничивается естественным шумовым фоном подстилающей поверхности, в нашем диапазоне частот была принята величиной $\sim 10^{-13}$ Вт.

Переменными параметрами условий зондирования являлись: дальность обнаружения; высота подвеса приемно-излучающих антенн (h_1), ЭНО (h_2) и их поляризация; частоты и энергетические параметры ЗС; электрофизические свойства подстилающей среды ϵ, σ . Диаграммы направленности приемно-излучающих антенн имели постоянные значения 40° , при этом мощность зондирования в данных диаграммах приводилась к эффективной площади объекта. ЭНО моделировался точечным НЭ, тип перехода моделировался p-n переходом. Параметры подстилающих сред ϵ, σ принимали значения, соответствующие различным типам почвогрунтов (например, сухой глинистый грунт с $\epsilon = 6, \sigma = 10^{-3}$ смс) и морской воде с $\epsilon = 80, \sigma = 5$ смс.

Анализ показал, что мощность ЗС оказывает незначительное влияние на дальность обнаружения и при указанных параметрах канала наблюдения приводит к увеличению на второй гармонике с 14 м при 2 кВт до 23 м при 10 кВт, а также до 150 м при 20 МВт. При этом наиболее целесообразно использовать круговую поляризацию ЗС.

Частотная зависимость мощности регистрируемого сигнала для двухчастотного ЗС, когда одна из частот зафиксирована (900 МГц), а вторая изменяется дискретно в интервале 0,1 ÷ 2,4 ГГц, показала, что увеличение

частоты ЗС свыше 1,5 ГГц не ведет к эффективному увеличению дальности обнаружения. При этом обнаружение объекта сильно зависит от интерференционной картины поля в пространстве между объектом и НРЛС.

Для реальных малоразмерных объектов диапазон зондирующего сигнала 0,5 – 1,5 ГГц подтвержден многочисленными экспериментами как наиболее оптимальный.

Увеличение высоты подвеса антенн над подстилающей поверхностью оказывает незначительное влияние на зависимость принимаемой мощности, что связано с уменьшением вклада отраженных от поверхности грунта волн в падающее на объект поле [3]. В то же время высота расположения ЭНО над поверхностью более значительно увеличивает дальность обнаружения при прочих равных условиях. Так, для высот расположения объекта $h_2 = 0; 0,25; 0,5$ м дальность обнаружения ЭНО составила 17, 13 и 20 м соответственно.

Оценка вклада поверхностной волны в полное поле второй гармоники осуществлялось по отношению амплитуд поверхностной и пространственной волн $S_{отн.}$.

На рис. 2 показана зависимость $S_{отн.}$ от частоты для вертикальной поляризации ЗС. Параметры подстилающей среды: сухой грунт $\epsilon = 6, \sigma = 10^{-3}$ смс (линия 1) и морская вода $\epsilon = 80, \sigma = 5$ смс (линия 2).

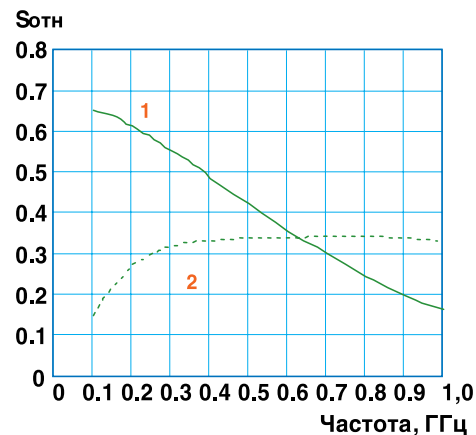


Рис. 2.

На рис. 3 показана зависимость вклада поверхностной волны для вертикальной поляризации ЗС от высоты подвеса ЭНО ($f = 1,0$ ГГц, высота подвеса антенн 1,5 м). Параметры подстилающей среды: сухой глинистый грунт (линия 1), морская вода (линия 2). Расстояние от локатора до ЭНО 20 м. Как и следовало ожидать,

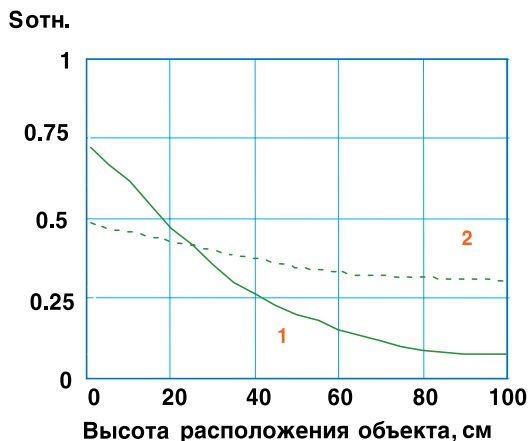


Рис. 3.

относительный вклад поверхностной волны убывает с ростом h_2 (аналогично и h_1), при этом в зависимости от электрофизических параметров подстилающей среды наблюдаются существенные различия.

На рис. 4 показана зависимость $S_{отн}$ от дальности при тех же условиях и расположении ЭНО $h_2 = 0,5$ м. При этом линия 1 соответствует сухому грунту, линия 2 – морской воде. С увеличением дальности вклад поверхностной волны существенно возрастает, что связано с ослаблением пространственной волны при зондировании, близким к скользящему, а также различным законам изменения амплитуд составляющих поля с расстоянием.

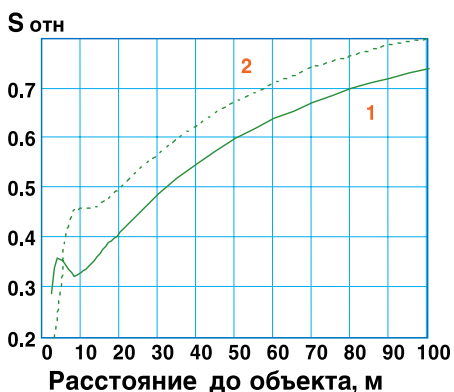


Рис. 4.

Сравнение математического моделирования и экспериментальных результатов для второй гармоники регистрируемого сигнала приведено на рис. 5 (линия 1 – расчетная, линия 2 – экспериментальная).

Расчетная зависимость принимаемой мощности второй гармоники от дальности проводится для горизонтального вибратора с точечным НЭ при круговой поляризации приемно-излучающих антенн локатора. Параметры наблюдения: высота подвеса приемно-излучающих антенн $h_1 = 3$ м; объекта – $h_2 = 15$ см; $P_{подв.} = 10$ кВт; частота излучения локатора – 980 МГц. Параметры подстилающей среды: сухой глинистый грунт с $\epsilon = 6$, $\sigma = 10^{-3}$ смс. Из полученных результатов следует четко выраженная интерференционная картина нелинейно-рассеянных полей. Этим, в частности, объясняются экспериментальные факты отсутствия сигналов вторых гармоник от ЭНО в отдельных точках пространства даже в ближней зоне.

Условия эксперимента: высота подвеса антенн локатора – 3 м; мощность излучения – 10 кВт; частота излучения – 980 МГц; поляризация ЗС – круговая; диаграмма направленности антенн НРЛС – 90° . В качестве

объекта использовалась противотанковая мина с электронным взрывателем производства стран НАТО в штатном исполнении. Электрически нелинейный объект представлял собой электронную плату взрывателя с произвольным набором элементарных вибраторов, нагруженных на произвольные нелинейные элементы. Плата взрывателя располагалась параллельно подстилающей поверхности (сухой грунт) на высоте $h_2 = 15$ см. Дискретизация расстояния в условиях эксперимента (рис. 5, линия 2) на дистанции $2,5 \div 21,5$ м составляла 0,5 м. В эксперименте также наблюдается интерференционная зависимость.

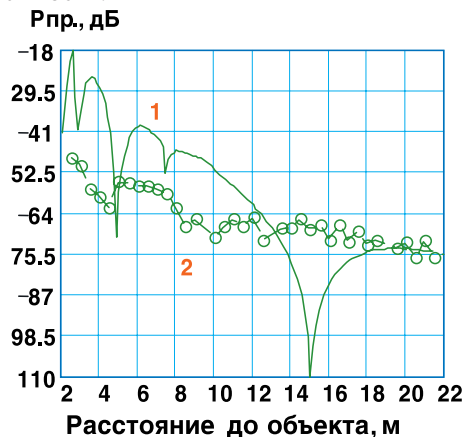


Рис. 5.

Отличия результатов математической модели и физического эксперимента дополнительно объясняются различными значениями: $\vec{F}_{пр.}(\Theta)$ – диаграммы направленности антенн НРЛС – 40° и единичным элементарным вибратором, нагруженного на точечный НЭ с прогнозируемым значением $\vec{F}(\Theta)$ в модели, а также диаграммы направленности антенн реальной НРЛС – 90° и статистически неопределенный ЭНО со статистически неопределенным значением $\vec{F}_{об.}(\Theta)$ в реальном объекте.

Эксперименты с НРЛС (мощность излучения – 20 МВт, чувствительность приемника – 110 дБВт, высота подвеса антенн – 3 м) показали, что дальность обнаружения противотанковой мины составляет 85 м. Это достаточно хорошо согласуется с расчетом (100 м) для вертикального вибратора с $h_2 = 0,1$ м. Данный эксперимент также является подтверждением зависимости поверхностной волны от дальности (рис. 4).

Аналогичные результаты были получены при обнаружении элементарного вибратора, нагруженного на диод Д9, и противотанковой мины, располагаемых в морской воде на глубине 0,6 м, при волнении моря 1 балл (мелкая рябь). Параметры НРЛС соответствовали вышеприведенным.

Таким образом, поле поверхностной волны можно не учитывать лишь на малых расстояниях, когда $r \leq 10\lambda$ и при больших углах зондирования, когда h_1 и h_2 достаточно велики.

Если в интерференционное уравнение ввести коэффициент R_m , учитывающий частотную зависимость поглощающих свойств подстилающих сред, аналогично R в (2), полученное уравнение позволяет рассчитать результат радиолокационного наблюдения ЭНО, находящегося под поверхностью сред.

Для подстилающих поверхностей в виде жидких сред за счет коэффициента R_m возможно прогнозировать ре-

зультат наблюдения ЭНО на глубине до 5 м, включая состояние поверхности этих сред в зависимости от метеорологических условий по девятибалльной системе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на приближение геометрической оптики, полученное уравнение наземной НРЛ с учетом поверхностных волн и при выполнении условия $r \gg \lambda$ (особенно на расстояниях 10 м и более) показывает высокую точность расчета дальности обнаружения ЭНО при заданных параметрах НРЛС. Это подтверждается экспериментальными исследованиями, пример сравнения которых с математическим моделированием показан на рис. 5.

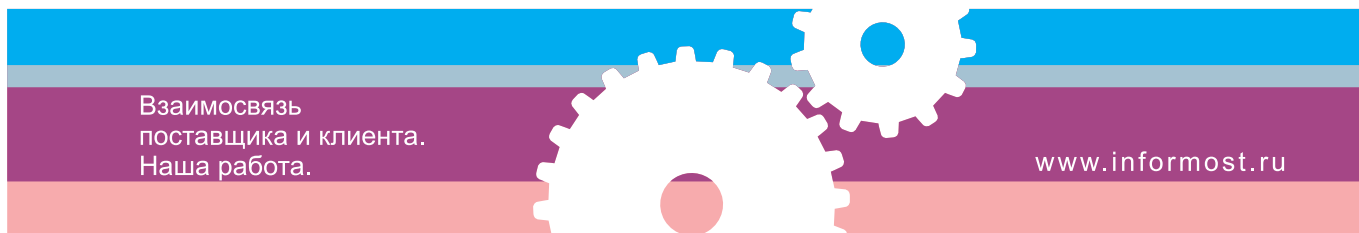
Ввиду множества переменных параметров невозможно представить данное уравнение наземной НРЛ в явном виде. В то же время в работе показан алгоритм решения задач в соответствии с требуемыми условиями для каждого конкретного случая.

К сожалению, малый объем статьи не позволяет привести более подробный иллюстрационный материал

расчетов по полученному интерференционному уравнению, которое позволяет учесть широкий круг задач для наблюдения электрически нелинейных объектов, расположенных на поверхности подстилающих сред.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Norton Y.A. The calculation of ground – wave field intensity over a finitely conducting spherical carts. // Proc. IRE. – 1941. – V. 29. – P. 105–123.
2. Елисеев О.В., Козлов В.Д., Лещанский Ю.И. и др. Обнаружение локальных дефектов с переменными параметрами в сильно поглощающей диэлектрической среде // Дефектоскопия. – 1979. – № 4. – С. 21–29.
3. Стреттон Дж .А. Теория электромагнетизма. – М., 1949.
4. Вернигоров Н.С., Борисов А.Р., Харин В.Б. К вопросу о применении многочастотного сигнала в нелинейной радиолокации // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 42. – № 1. – С. 63–69.

Взаимосвязь поставщика и клиента. Наша работа.

www.informost.ru



БОЛЬШЕ
ВОЗМОЖНОСТИ
ДЛЯ БИЗНЕСА

журнал для специалистов
ИНФОРМОСТ
радиоэлектроника и телекоммуникации
www.informost.ru



Телефонные и мульти-сервисные коммутационные системы для различных ведомств

→ **Интеллектуальная телекоммуникационная платформа «Протон-ССС»**

- АТС различных типов
- Емкость от 50 до 30 000 портов
- Оборудование доступа к IP-сетям (шлюз IP-телефонии)
- Система связи с функциями Call-центра
- Поддержка SIP
- Концентратор абонентской нагрузки
- Конвертор сигнализации и кросс-коммутатор



ОАО «УПП «ВЕКТОР»
620078, Россия,
г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 28
Тел.: (343) 375-4360
Тел./факс: (343) 349-5066
E-mail: market@vektor.ru
<http://www.vektor.ru>

Приглашаем Вас посетить наш стенд на выставке «ВКСС-2005»,
07-10 декабря 2005 г., г. Москва, Комплекс Гостинный Двор, стенд С 3.3