

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РЕЗОНАНСНОЙ КОМПРЕССИИ ПРИ ПОДПОВЕРХНОСТНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В УКРЫВАЮЩИХ СРЕДАХ

USING THE METHOD OF RESONANT COMPRESSION IN SUBSURFACE SENSING OF LOCAL OBJECTS IN SHELTERING ENVIRONMENTS

**E. Shoshin
O. Semenov**

Summary. The use of resonant compression increases the energy potential of radar subsurface probing. At meter and decimeter wavelengths increase the energy potential in the 20–28 dB leads to a significant increase in the probing depth and improved contrast in radar images of the identified local objects in sheltering environments. Characteristics of probing signals generated by resonant compression allow you to use the effect of nonlinear scattering signals in the conduct of aerial reconnaissance.

Keywords: radar subsurface sounding, resonant compression, radar contrast, nonlinear scattering.

Шошин Евгений Леонидович

К.т.н., доцент,

Сургутский государственный университет

shoshinb@mail.ru

Семенов Олег Юрьевич

К.ф.-м.н., доцент,

Сургутский государственный университет

ous.tutor.phinma@mail.ru

Аннотация. Использование эффекта резонансной компрессии увеличивает энергетический потенциал радиолокаторов подповерхностного зондирования. В метровом и дециметровом диапазоне длин волн увеличение энергетического потенциала на 20–28 дБ приводит к существенному увеличению глубины зондирования и улучшению контраста в радиолокационных изображениях установленных локальных объектов в укрывающих средах. Характеристики зондирующих сигналов, сформированных методом резонансной компрессии, позволяют использовать эффект нелинейного рассеяния сигналов при ведении воздушной разведки.

Ключевые слова: радиолокатор подповерхностного зондирования, резонансная компрессия, радиолокационный контраст, нелинейное рассеяние.

Введение

Используемые в подповерхностной радиолокации методы ударного возбуждения передающих антенн [1] позволяют получить излученный сигнал в форме 1–2 периодов квазигармонических сигналов. Пиковая мощность излучаемых импульсных сигналов ограничена возможностями полупроводниковых приборов, входящих в состав формирователя, и в настоящее время не превышает 0,9...1,8 Вт при частоте следования в несколько килогерц [2]. Прохождение сверхширокополосных сигналов в подповерхностных средах сопровождается значительным затуханием, которое тем больше, чем больше влажность грунта и больше частота излучения. Энергетический потенциал промышленно выпускаемых георадаров в настоящее время не превышает 140 дБ, что не позволяет вести воздушную разведку и эффективно обнаруживать локальные объекты с высоты несколько сот метров [1,3].

В данной статье обсуждается возможность реализации метода резонансной компрессии при подповерхностном зондировании локальных объектов в укрывающих средах и использования механизма нелинейного рассеяния.

Формирование

и рассеяние излученных сигналов

Рассмотрим реализацию метода резонансной компрессии при подповерхностном зондировании почвогрунтов, согласно которому на вход резонансного компрессора поступают высокочастотные радиоимпульсы, вырабатываемые узкополосным СВЧ генератором, а с выхода компрессора снимают мощные наносекундные импульсы [4]. Преобразование импульсных радиосигналов компрессором осуществляется путем накопления электромагнитной энергии в высокодобротном резонаторе в течение времени

$$t_n = (3...5)t_p,$$

где $t_p = Q_H / \omega_0$ — постоянная времени резонатора, Q_H — нагруженная добротность резонатора, ω_0 — круговая резонансная частота) и последующим быстрым её выводом в нагрузку при изменении связи за время $t_B \ll t_p$. Это позволяет не только сократить длительность импульса, но и увеличить пиковую мощность. Коэффициент увеличения мощности M связан с отношением длительности импульса на входе $\tau_{вх}$ и на выходе $\tau_{вых}$ устройства компрессии соотношением

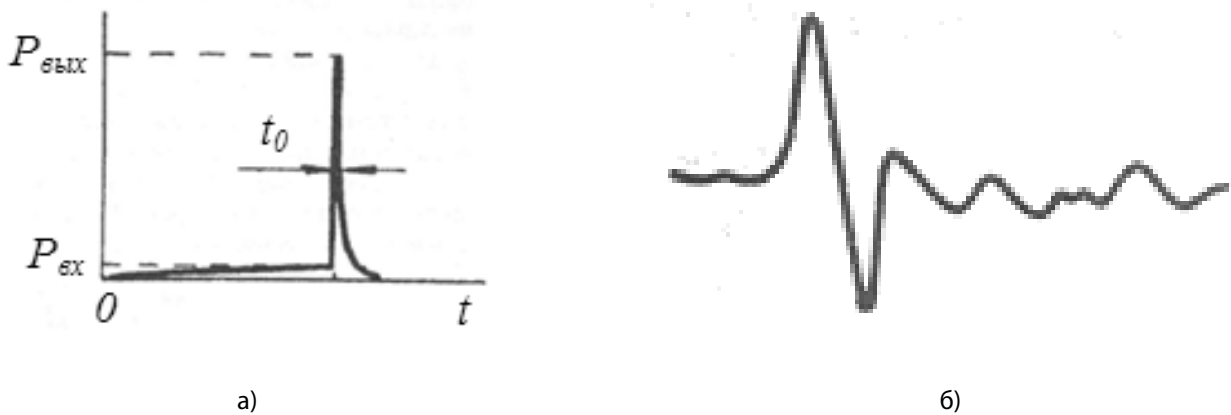


Рис. 1. Временная диаграмма зондирующего сигнала

$$M = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \eta \frac{\tau_{\text{вх}}}{\tau_{\text{вых}}} \quad (1)$$

здесь $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$ — соответственно мощности на входе и выходе компрессора, η — КПД преобразования энергии импульса поступающего на вход компрессора в энергию выходного импульса. Так, например, при поступлении от СВЧ генератора импульсов частотой 900 МГц, длительностью 1 мкс и пиковой мощностью в 1 кВт, на выходе резонансного компрессора будут получены радиоимпульсы той же частоты, длительностью 1,5–3 нс и пиковой мощностью в 100 кВт [5]. При этом, сформированные зондирующие сигналы в своем составе содержат сжатый импульс, предимпульсное и постимпульсное излучение (рис. 1а).

Форма и длительность сжатого импульса зависит от конструкции резонансного компрессора, и, как и при ударном возбуждении антенн, может соответствовать 1,5–2 периоду гармонического колебания (рис. 1б). Предимпульсное излучение возникает при передаче колебаний, формируемых СВЧ генератором, через резонансную систему компрессора в процессе накопления энергии, при этом, длительность предимпульса соответствует длительности импульса генератора СВЧ-колебаний и может составлять 50 нс–1 мкс. Амплитуда предимпульса в зависимости от типа используемого компрессора оказывается меньше амплитуды сжатого сигнала на 40–120 дБ. Постимпульсное излучение возникает после вывода запасенной энергии, при этом, длительность постимпульсного излучения составляет 20–300 нс, а максимальная амплитуда на 20–40 дБ меньше амплитуды сжатого импульса.

Эффект резонансной компрессии радиоимпульсов может быть реализован в метровом, дециметровом и сантиметровом диапазоне длин волн. Электрофизи-

ческие свойства укрывающих сред зависят от длины волны λ зондирующего сигнала, при этом, удельное поглощение радиоволны в песочном грунте составляет — 1000 дБ/м при $\lambda=2\dots3$ см, 50 дБ/м при $\lambda=20\dots25$ см, 10 дБ/м при $\lambda=1$ м [6]. Увеличение мощности зондирующего сигнала при резонансной компрессии в значительной степени компенсирует затухание сигнала в почвогрунтах, что приводит к увеличению глубины зондирования укрывающих сред в метровом и дециметровом диапазоне длин волн. Для иллюстрации качественных особенностей распространения сформированных методом резонансной компрессии сигналов в однородной изотропной среде, характеризуемой диэлектрической проницаемостью ε и проводимостью σ , рассмотрим одномерное приближение, пригодное для изучения плоских волн. В этом приближении распространение в среде волны напряженностью E может быть описано уравнением вида:

$$\nabla^2 E - \frac{\varepsilon}{A^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial E}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

Согласно (2) распространяющаяся в подповерхностной среде волна испытывает отражение только от тех участков подземной среды, в которых наблюдается пространственное изменение ее параметров: диэлектрической проницаемости ε , проводимости σ или обеих величин сразу. При распространении в подповерхностной среде сигнала, сформированного методом резонансной компрессии, форма сигнала, отраженного пластиковым объектом, будет повторять форму излученного сигнала при $\varepsilon_r > \varepsilon_l$ (ε_r — диэлектрическая проницаемость укрывающей среды, ε_l — диэлектрическая проницаемость локального объекта), что соответствует заглублению локального объекта в суглинок. (рис. 2а). При $\varepsilon_r < \varepsilon_l$ отраженный сигнал формируется в противофазе к зондирующему сигналу, как это происходит в диапазоне частот 600 МГц для пластиковых объектов, с материалом типа полиамид, заглубленных в сухой песок (рис. 2б).

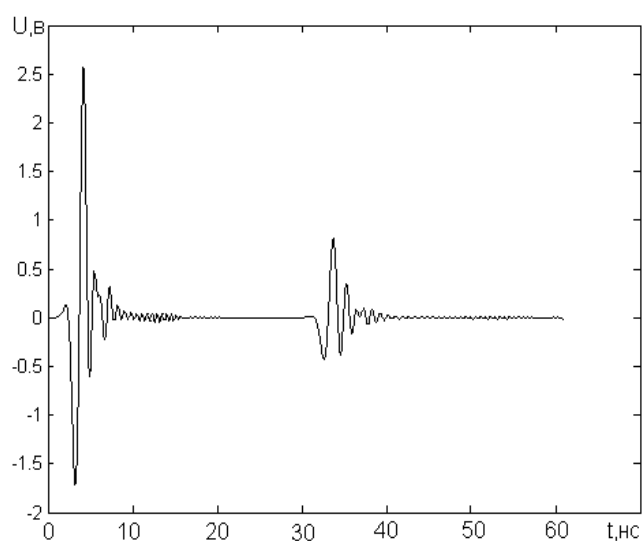
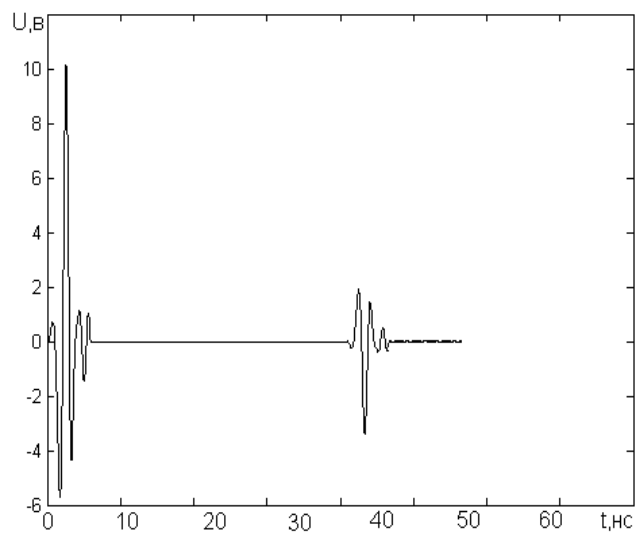
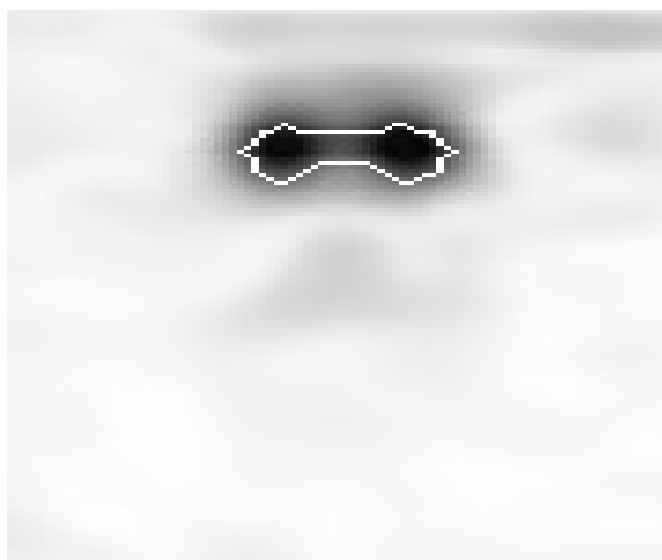
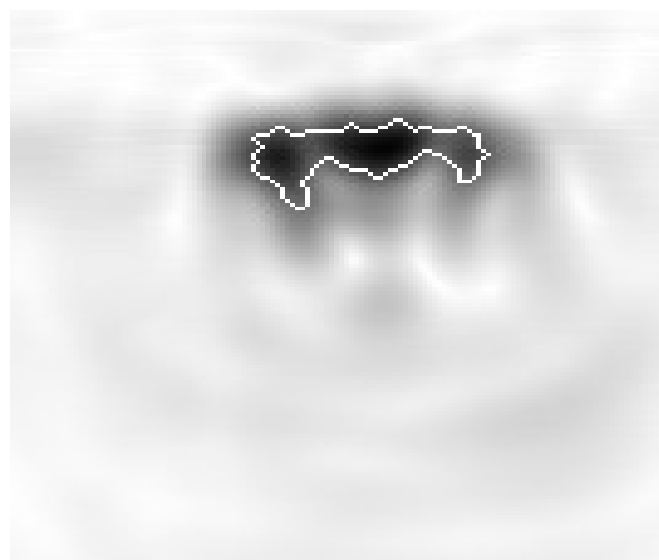
а) $\epsilon_{Г} = 9, \epsilon_{Д} = 3$ б) $\epsilon_{Г} = 4, \epsilon_{Д} = 8$

Рис. 2. Форма зондирующего и отраженного пластиковым объектом сигналов



а) пластиковый объект



б) металлический объект

Рис. 3. Радиолокационное изображение локальных объектов цилиндрической формы

Металлические объекты благодаря своей высокой электропроводности при заглублении в грунт формируют отраженный сигнал, синфазный излученному. Помимо этого, металлические объекты обладают хорошими отражающими свойствами. С целью сравнения энергетических характеристик рассеяния металлического и пластикового объектов близкого размера было проведено их экспериментальное радиолокационное обследование при заглублении в песок на 11 см. На рис. 3 приведены радарограммы объектов цилиндрической формы — пластикового диаметром 30 см (рис. 3а) и ме-

таллического диаметром 35 см (рис. 3б), полученные путем профилирования георадаром «ОКО» с поверхности укрывающей среды на центральной частоте 1700 МГц.

При обработке экспериментальных данных по формированию изображений были реализованы процедуры миграции, винеровской фильтрации, гамма-коррекции, сегментации и оконтуривания областей интереса. Анализ результатов свидетельствует о наличии выраженных центров рассеяния в изображениях объектов. Так для пластикового объекта наблюдается два центра

Таблица 1. Характеристики рассеяния локальных объектов

Объект	$\delta, \text{ м}^2$		
	ЦР 1	ЦР 2	ЦР 3
пластиковый	0,058	0,051	-
металлический	1,31	1,96	1,12

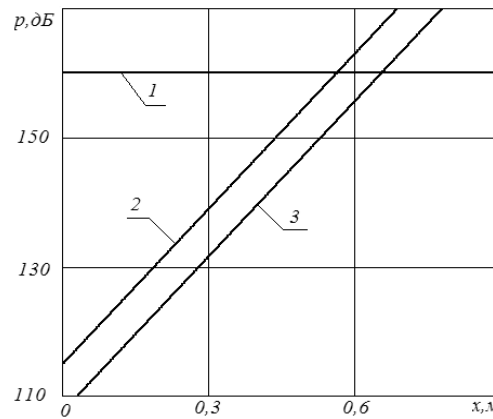


Рис. 4. Зависимость энергетического потенциала от глубины залегания объекта

рассеяния, а для металлического объекта три центра рассеяния. Это объясняется проведением измерений в ближней зоне действия георадара, в которой при профилировании объекта и формировании характеристик обратного рассеяния участвует не вся поверхность объекта, а лишь определенные фрагменты. При обработке радарограмм и реализации алгоритма синтеза апертуры антенны георадара увеличивается отношение сигнал/шум и формируются центры рассеяния (ЦР). В качестве количественной оценки характеристик рассеяния объектов использовалась эффективная поверхность рассеяния центра (ЭПРЦ) δ , которая определялась по формуле (3), где E_{Π} — уровень сигнала прямого прохождения с излучающей антенны, E_O — уровень отраженного центром рассеивания сигнала, ε — диэлектрическая проницаемость песка, R — глубина залегания объекта, S_A — эффективная апертура приемной антенны. Результаты расчета ЭПРЦ приведены в табл. 1 и свидетельствуют

о том, что пластиковые объекты обладают невысокой способностью к рассеянию падающих волн, что служит причиной к увеличению энергетического потенциала радиолокатора подповерхностного зондирования.

Энергетический потенциал радиолокационной системы с резонансной компрессией излученных сигналов

Энергетический потенциал радиолокационной системы при мощности узкополосного СВЧ передатчика

$P_{nep} = 1$ кВт и чувствительности приемника $P_{np} = 10^{-11}$ Вт составляет

$$p = \frac{P_{nep}}{P_{np}} = 140 \text{ дБ.}$$

$$\delta = \left[\frac{E_{\Pi} (1 - \varepsilon)}{4 E_O \sqrt{\varepsilon}} \right]^2 \frac{(4 \pi R^2)^2}{S_A} \quad (3)$$

$$p = 10 \log \left[\frac{64 \pi^3 (H + x/\sqrt{\varepsilon})^4}{G_{ПЕР} G_{ПР} \lambda \delta} \right] + 2 \Gamma x - 20 \log(1 - k^2) \quad (4)$$

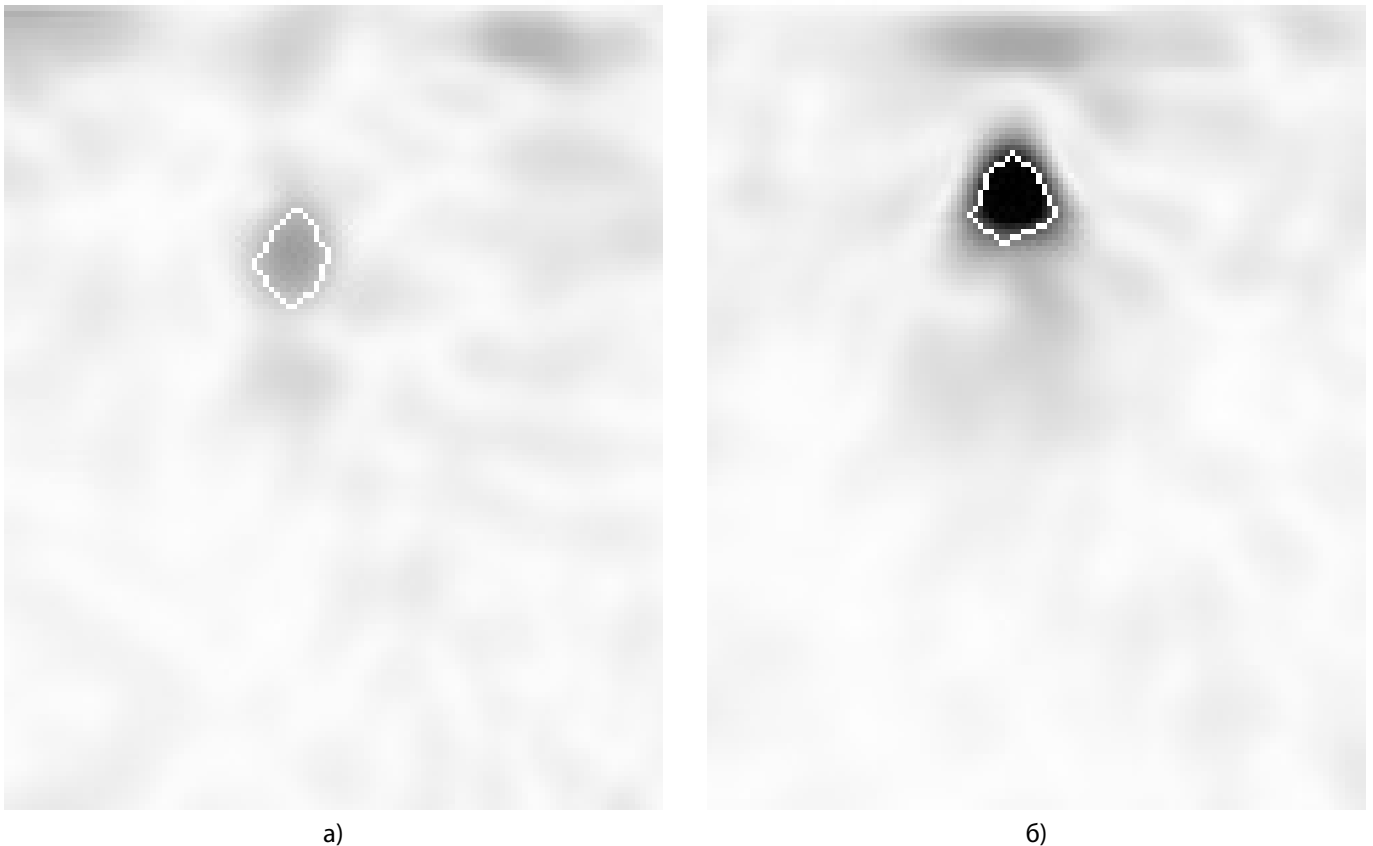


Рис. 5. Радиолокационное изображение пластикового объекта при различном энергетическом потенциале радиолокационной системы

Реализация резонансной компрессии излученного сигнала на несущей частоте в 900 МГц с коэффициентом усиления 100 увеличивает энергетический потенциал системы до 160 дБ.

Согласно [7] энергетический потенциал системы воздушного базирования, необходимый для зондирования подповерхностной среды на глубину x , может быть определен как (4) где H — высота полета, ε — диэлектрическая проницаемость подповерхностной среды, $G_{\text{ПЕР}}$ и $G_{\text{ПР}}$ — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, δ — ЭПР цели, Γ — погонное затухание в среде, k — коэффициент отражения сигнала от границы воздух-грунт. На рис. 4 приведен энергетический потенциал радиолокационной системы с резонансной компрессией излученных сигналов (кривая 1) и результаты расчета согласно (4) энергетического потенциала, необходимого для обнаружения объекта с $\delta = 1 \text{ м}^2$ в диапазоне частот 900 МГц при следующих допущениях: $H = 100 \text{ м}$, $\varepsilon = 4$ (песок), $\Gamma = 40 \text{ дБ/м}$, $k = 0,33$.

Результаты расчета свидетельствуют об увеличении глубины зондирования почвогрунтов для радиолокационной системы с реализованной в ней резонансной

компрессией излученных сигналов, при этом, диапазон глубин достигает 0,7 м для высоконаправленных антенн при $G_{\text{пер}} = G_{\text{пр}} = 7$ (кривая 2) и 0,55 м для слабонаправленных антенн при $G_{\text{пер}} = G_{\text{пр}} = 3$ (кривая 3). Для объектов, находящихся на глубине в 0,1–0,2 м, увеличение энергетического потенциала системы приводит к лучшему радиолокационному контрасту при построении изображений, что увеличивает вероятность обнаружения объектов. С целью проверки влияния энергетического потенциала подповерхностного радиолокатора на формирование радиолокационного контраста изображений объектов и их реконструкции было проведено экспериментальное радиолокационное обследование инженерного объекта, заглубленного в песок на глубину 12 см. На рис. 5 приведены радарограммы пластикового объекта цилиндрической формы диаметром 14 см, полученные георадаром «ОКО» путем профилирования с поверхности укрывающей среды на центральной частоте 1700 МГц в ходе зондирования антенной типа «бабочка» с коэффициентами усиления $G = 2$ (рис. 5а) и $G = 5$ (рис. 5б).

При обработке экспериментальных данных по формированию изображений были реализованы процеду-

ры миграции, винеровской фильтрации, сегментации и оконтуривания областей интереса. В качестве оценки радиолокационного контраста использовался параметр $q = S_1/S_2$, где S_1 — усредненный уровень сигнала в области интереса (объекта), S_2 — усредненный уровень сигнала в изображении, при этом, для изображения на рис. 5а радиолокационный контраст составил $q = 1.34$, а для изображения на рис. 5б — $q = 4.32$. Полученные результаты свидетельствуют об улучшении радиолокационного контраста для радиолокатора с более высоким энергетическим потенциалом, что является необходимым условием надежного обнаружения локальных объектов в укрывающих средах.

Нелинейное рассеяние сигналов при резонансной компрессии излученных сигналов

Для рукотворных радиолокационных объектов, содержащих в своем составе полупроводниковые элементы и коррозированные металлические поверхности, рассеянный сигнал содержит вторую и третью гармоники частоты излученного сигнала [8]. Для того, чтобы при облучении рукотворного объекта состоялось ярко выраженное нелинейное рассеяние необходимо обеспечить превышение длительности зондирующего сигнала над длительностью переходных процессов детектирования падающего на нелинейный радиолокационный объект электромагнитного поля. Согласно [9] для эффективного нелинейного рассеяния длительность зон-

дирующего сигнала должна превышать 10–20 нс, что превышает длительность сжатого импульса, сформированного по методу резонансной компрессии. Последнее означает, что механизм нелинейного рассеяния от рукотворного объекта будет определяться действием достаточно протяженных предимпульса и постимпульса, а с учетом различия их уровней (рис. 1), наибольший вклад в формирование нелинейного рассеянного сигнала обеспечивает постимпульс. Вводя в состав радиолокационной системы воздушного базирования канал приема, настроенный на вторую или третью гармонику частоты излученного сигнала, можно повысить эффективность обнаружения локальных объектов за счет частотно-селективного подавления сигналов от местных предметов.

Заключение

Таким образом, использование эффекта резонансной компрессии увеличивает энергетический потенциал радиолокаторов подповерхностного зондирования. В метровом и дециметровом диапазоне длин волн увеличение энергетического потенциала на 20–28 дБ приводит к существенному увеличению глубины зондирования и улучшению контраста в радиолокационных изображениях установленных локальных объектов в укрывающих средах. Характеристики зондирующих сигналов, сформированных методом резонансной компрессии, позволяют использовать эффект нелинейного рассеяния сигналов при ведении воздушной разведки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография/под ред. А.Ю.Гринева. -М.: Радиотехника, 2005.-416с.
2. Белкин В. С., Шульженко Г. И. Формирователи высоковольтных наносекундных импульсов с низковольтным питанием//Приборы и техника эксперимента, 1994, № 4, с. 68–72.
3. Дикарев В. И., Заренков В. А., Заренков Д. В. Методы и средства обнаружения объектов в укрывающих средах/под ред. Заренкова В. А.. — СПб.: Наука и техника, 2004.-280с.
4. Диденко А. Н., Юшков Ю. Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984 г., с. 68
5. Диденко А. Н., Новиков С. А., Разин С. В., Чумерин П. Ю., Юшков Ю. Г. Формирование мощных сверхширокополосных радиосигналов при последовательной временной компрессии СВЧ энергии // Доклады АН СССР. — 1991.-Т. 321, № 3. С. 518–520.
6. Николаев А. В. Влияние укрывающей среды на глубину зондирования в нелинейно-параметрической локации // Спецтехника и связь.-2011.-№ 1.С.26–32.
7. Финкельштейн М. И., Лазарев Э. И., Чижов А. Н. Радиолокационные аэроледомерные съемки рек, озер, водохранилищ.-Л: Гидрометеиздат.-1984.-113с.
8. Вернигоров Н. С. Практические применения нелинейного радиолокатора // Безопасность от А до Я. 1998. № 2–3. С. 14–15.
9. Щербakov Г. Н., Шлыков Ю. А., Николаев А. В., Бровин А. В. К оценке фундаментальных пределов в нелинейной радиолокации/ Спецтехника и связь, 2008, № 2, с. 21–25.

© Шошин Евгений Леонидович (shoshin6@mail.ru), Семенов Олег Юрьевич (ous.tutor.phinma@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»