

ПОДПОВЕРХНОСТНЫЙ РАДИОЛОКАТОР С РЕЗОНАНСНОЙ КОМПРЕССИЕЙ ИЗЛУЧЕННЫХ СИГНАЛОВ¹

Е.Л.Шошин, П.Ю.Чумерин, Ю.Г. Юшков

Анализируется возможность реализации метода резонансной импульсной компрессии в подповерхностной радиолокации. Приводятся данные экспериментальных исследований по формированию сверхширокополосных сигналов с помощью резонансных компрессоров. Рассматриваются физические аспекты механизма распространения сверхширокополосных сигналов в почвогрунтах.

THE SUBSURFACE RADAR WITH A RESONANT COMPRESSION OF THE RADIATED SIGNALS¹

E.L.Shoshin, P.Yu.Chumerin, Yu. G. Yushkov

Possibility of realization of a method of a resonant compression of the radiated signals in a subsurface radar-location is analyzed. Data of pilot studies of coaxial resonant compressors are provided. Physical aspects of the mechanism of distribution of superbroadband signals in soils are considered.

Введение

Энергетический потенциал современных поисковых георадаров достигает 140 дБ [1], что позволяет обнаруживать объекты на глубине 0,2-15 м в зависимости от несущей частоты зондирующего сигнала и вносимого укрывающей средой затухания. Увеличение приемопередающего потенциала радиолокатора подповерхностного зондирования приводит к более надежному обнаружению объекта, находящегося в укрывающей среде на большей глубине. Один из способов, позволяющих увеличить энергетический потенциал радара, является резонансная импульсная компрессия, которая использует резонансное накопление высокочастотной энергии и быстрый её вывод в виде более мощного и короткого СВЧ-

¹Работа выполнена при частичной финансовой поддержке за счет субсидии в рамках программ повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

импульса [2].

В данном докладе обсуждается возможность создания в диапазоне частот 36 МГц – 2,8ГГц георадара, в котором при формировании зондирующих сигналов используется метод резонансной компрессии импульса узкополосного передатчика.

Радиолокатор подповерхностного зондирования

Структурная схема подповерхностного радиолокатора с резонансной компрессией импульсов передатчика представлена на рис. 1.

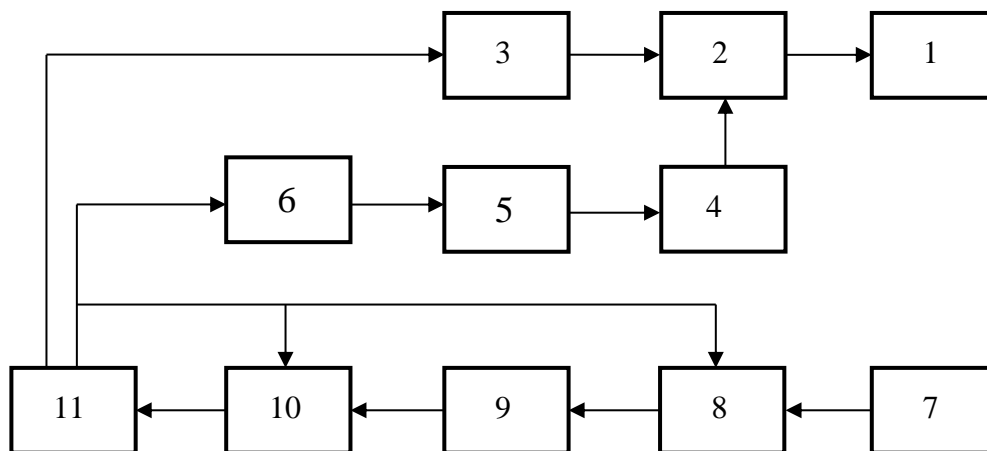


Рис.1. Структурная схема подповерхностного радиолокатора с резонансной компрессией излученных сигналов

Радиолокатор включает в себя: 1 – передающую антенну, 2 - устройство резонансной компрессии, 3 - блок управления коммутатором, 4 - циркулятор, 5 – СВЧ генератор, 6 – импульсный модулятор, 7 – приемную антенну, 8 – электронный ключ, 9 –усилитель, 10 – стробоскопический преобразователь, 11 - устройство синхронизации и обработки сигналов.

Принцип работы радиолокатора подповерхностного зондирования основан на использовании метода сверхширокополосного радиолокационного зондирования подповерхностных сред и объектов [3], при котором оцениваются характеристики нестационарного электромагнитного поля, формируемого при рассеянии от неоднородностей, включений и границ после их облучения последовательностью сверхкоротких радиоимпульсов. При этом, на вход резонансного компрессора поступает высокочастотные радиоимпульсы, вырабатываемые СВЧ генератором, а с выхода компрессора снимают

мощные наносекундные радиоимпульсы. Преобразование импульсных радиосигналов компрессором осуществляется путем накопления электромагнитной энергии в высокодобротном резонаторе в течение времени $t_n = (3 \dots 5)t_p$ (где $t_p = Q_n / \omega_0$ постоянная времени резонатора, Q_n -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 τ_{ex} и на выходе $\tau_{вых}$ устройства компрессии соотношением

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

здесь P_{ex} и $P_{вых}$ - соответственно мощности на входе и выходе компрессора, η - КПД преобразования энергии импульса поступающего на вход компрессора в энергию выходного импульса.

Радиолокатор подповерхностного зондирования с резонансной компрессией импульсов передатчика работает следующим образом [4]. Устройство синхронизации и обработки сигналов формирует сигналы запуска импульсного модулятора, стробоскопического преобразователя и электронного ключа в моменты времени

$$t = nT, n = 1, 2, 3 \dots$$

где T – период следования синхроимпульсов, что приводит к формированию модулирующих сигналов, снимаемых с выхода импульсного модулятора и поступающих на управляющий вход СВЧ генератора. Генератор формирует радиоимпульсы, которые поступают на вход устройства резонансного компрессора. Циркулятор согласует СВЧ-генератор при его работе на резонансную нагрузку, в качестве которой выступает устройство резонансной компрессии.

По окончании процесса накопления, равного длительности импульса t_n СВЧ-генератора, устройство синхронизации и управления формирует сигналы запуска блока управления коммутатором в моменты времени

$$t = nT + t_n, n = 1, 2, 3 \dots$$

Сигналы запуска переводят устройство резонансной компрессии из режима накопления в режим вывода накопленной энергии, в результате чего формируются мощные импульсы наносекундной длительности. Сформированные импульсы поступают на вход передающей антенны и излучаются в почвогрунты.

Неоднородности, границы раздела, пустоты и разуплотнения подповерхностной среды рассеивают зондирующие сверхкороткие импульсы, при этом, обратно рассеянные сигналы улавливаются приемной антенной. Принятые антенной сверхширокополосные сигналы поступают в электронный ключ, который открывается на длительность 50-500 нс, что соответствует глубине зондирования в 3-30 м. Усилитель компенсирует затухание обратно рассеянных сигналов в подповерхностной среде. Стробоскопический преобразователь выполняет масштабное-временное преобразование и переводит принятые сверхкороткие импульсы в цифровую форму, необходимую для дальнейшей обработки. Выделенные методом сверхширокополосного зондирования неоднородности, границы раздела, пустоты и разуплотнения отображаются индикатором, входящим в состав устройства синхронизации и обработки сигналов.

Формирование сверхширокополосных импульсов в коаксиальных системах компрессии в диапазоне частот 36 МГц-2,8 ГГц.

Формирование сверхширокополосных импульсов методом резонансной компрессии предполагает использование резонансных систем, в которых отсутствует дисперсия и значение групповой скорости $v_{гр} = c$, где c - скорость света [2]. В Томском политехническом университете разработаны конструкции резонансных компрессоров, которые удовлетворяют этим условиям [5-9]. Схема устройства компрессии и осциллограмма сформированного импульса на центральной частоте 2,8 ГГц приведены на рисунке 2 (а-б).

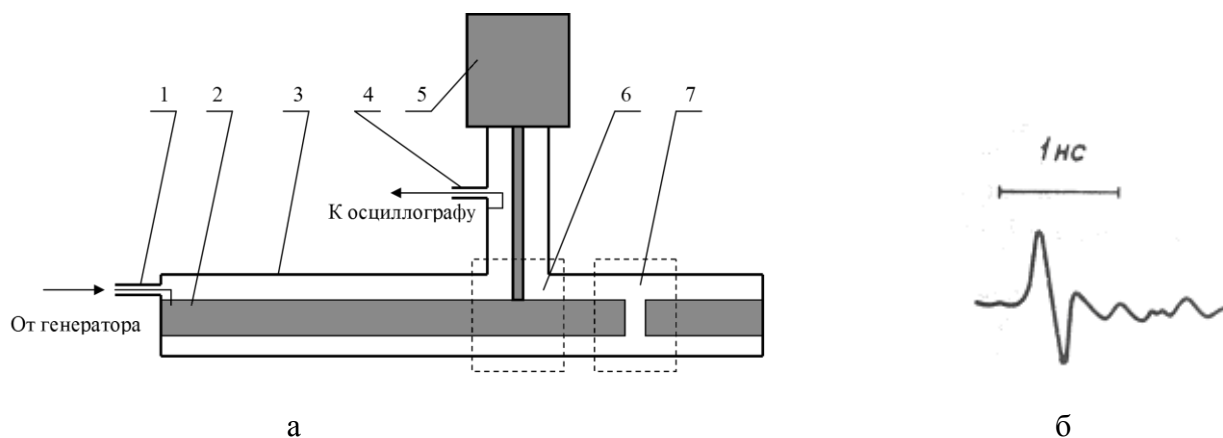


Рис. 2. Схема устройства резонансного компрессор (а) и осциллограмма зондирующего сигнала (б):

1- петля возбуждения; 2- внутренний проводник; 3- внешний экран; 4- петля индикации; 5- согласованная нагрузка; 6- Т-образное сочленение; 7- ёмкостной зазор разрядника.

Компрессоры выполняются на основе Т-образного сочленения коаксиальных волноводов. Одно из плеч сочленения закорочено, и переключение режима накопления в режим вывода происходит за счет инверсии фазы волны, распространяющейся из этого плеча. Инверсия фазы осуществляется быстрой перестройкой укорачивающей емкости, образованной разрывом центрального проводника, при развитии в зазоре искрового СВЧ-разряда [5-8].

Длительность импульса на выходе компрессоров коаксиального типа равна времени двойного пробега волны вдоль резонансного отрезка коаксиального волновода, который ограничен с одной стороны Т-образным сочленением, а с другой торцевой стенкой. При длине волновода $l=\lambda/2$ длительность импульса составляет период колебаний резонансной частоты. Конструкция компрессора, приведенная на рисунке 2(а), использовалась при создании источников сверхширокополосных импульсов в диапазоне 150-3000 МГц и пиковой мощностью от 100кВт до 630МВт [5-8].

Габаритные размеры компрессора не могут быть меньше длины волны рабочего типа колебаний в выбранной резонансной линии. Поэтому при освоении диапазона часто 36 МГц-2,8 ГГц данный параметр становится определяющим для практического использования метода временной компрессии при создании генераторов с длительностью выходного излучения от одного до нескольких периодов колебаний несущей частоты. Одним из способов преодоления указанной проблемы является использование отрезков резонансных линий медленных волн при реализации внутреннего проводника резонансной системы. В этом случае уменьшение габаритных размеров будет обратно пропорционально увеличению коэффициента замедления. Требуемые значения коэффициента замедления при создании компрессоров метрового диапазона длин волн составляют 5-100 раз. Среди замедляющих систем удовлетворяющих этому параметру, известны спиральные замедляющие линии. В таблице 1 приведены параметры импульсов излучения исследованных коаксиальных резонансных компрессоров.

Таблица 1. Параметры импульсов излучения на выходе коаксиальных компрессоров.

Несущая частота, МГц.	Длительность импульса, нс	Пиковая мощность, кВт	Частота повторения, Гц	Коэффициент усиления мощности М, дБ
36.5	75	160	10	12
150	20	1600	500	22

900	2.5	100	1000	20
2800	0.5	630 000	400	28

Проведенные исследования показывают, что с использованием классических СВЧ генераторов и резонансных импульсных компрессоров коаксиального типа возможно создания в диапазоне частот от 36 МГц до 2,8 ГГц источников зондирующего сигнала для радиолокаторов подповерхностного зондирования с высоким энергетическим потенциалом.

Излучение сверхширокополосных сигналов в почвогрунты

Эффект резонансной компрессии радиоимпульсов может быть реализован в метровом, дециметровом и сантиметровом диапазоне длин волн. Электрофизические свойства почвогрунтов зависят от длины волны λ зондирующего сигнала, при этом, согласно [1] удельное поглощение радиоволны в песочном грунте составляет - 1000 дБ/м при $\lambda=2...3$ см, 100 дБ/м при $\lambda=20...25$ см, 10 дБ/м при $\lambda=1$ м. Увеличение мощности зондирующего сигнала при резонансной компрессии, согласно данным табл.1, в значительной степени, компенсирует затухание сигнала в почвогрунтах, что приводит к существенному увеличению глубины зондирования и улучшению характеристик обнаружения объекта в укрывающей среде в метровом и дециметровом диапазоне длин волн. В сантиметровом диапазоне длин волн затухание сигнала, излученного в почвогрунты, особенно велико, что ограничивает глубину зондирования укрывающих сред. Вместе с тем, увеличение энергетического потенциала радиолокатора позволяет улучшить вероятность обнаружения объектов, находящихся в укрывающей среде на небольшой глубине. Одним из практических применений метода резонансной компрессии в сантиметровом диапазоне длин волн является построение самолетного георадарного комплекса, предназначенного для обнаружения мин в почвогрунтах на глубине 10-20 см.

Для иллюстрации качественных особенностей распространения электромагнитных волн 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 \vec{E} может быть описано уравнением вида:

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

Согласно (2) распространяющаяся в подземной 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. Проводимость среды σ присутствует в волновом уравнении (2) как коэффициент перед первой производной по времени, которая, как известно, определяет поглощение волновой энергии. Глубина зондирования и пространственное разрешение сверхкоротких импульсов напрямую связаны с проводимостью среды.

Решение волнового уравнения (2) в виде затухающей монохроматической волны:

$$E = \exp(-px - ikx + i\omega t), \quad (3)$$

где k – волновое число, ω – круговая частота, x – расстояние позволяет определить коэффициент затухания [10]:

$$p = \sqrt{-\frac{\varepsilon \omega^2}{2c^2} + \sqrt{\frac{\varepsilon^2 \omega^4}{4c^4} + \frac{\mu_0^2 \sigma^2 \omega^2}{4}}}. \quad (4)$$

Коэффициент затухания характеризуется асимптотическим поведением в области низких ($\omega \rightarrow 0$) и в области высоких ($\omega \rightarrow \infty$) частот:

– в области низких частот:

$$p = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{4}; \quad (5)$$

– в области высоких частот:

$$p = \frac{\mu_0 \sigma c}{2\sqrt{\varepsilon}}. \quad (6)$$

В этих двух предельных случаях проводимость среды влияет на распространение радиоволн по-разному. В области низких частот затухание зависит от частоты и при ее снижении может быть сколь угодно малым. Но в этом диапазоне широкополосные сигналы испытывают дисперсию, т.е. искажение своей формы. В области высоких частот затухание не зависит от частоты, что приводит при распространении радиоимпульса только к уменьшению его амплитуды без изменения формы.

На рис.3(а) представлены результаты моделирования формы радиоимпульса при его распространении в песчаном грунте с влажностью $V \approx 10\%$. Низкая проводимость песка

влияет в основном на его амплитуду, форма импульса остается практически без изменений. На рис.3(б) представлены результаты моделирования условий распространения сверхкороткого импульса во влажном суглинке с умеренным содержанием глинистых частиц и высокой объемной влажностью $V \approx 20 - 25 \%$. Влияние сильной проводимости «низкочастотного» типа приводит не только к уменьшению амплитуды, но и к сильному искажению импульса, которое проявляется в виде появления длинных «хвостов».

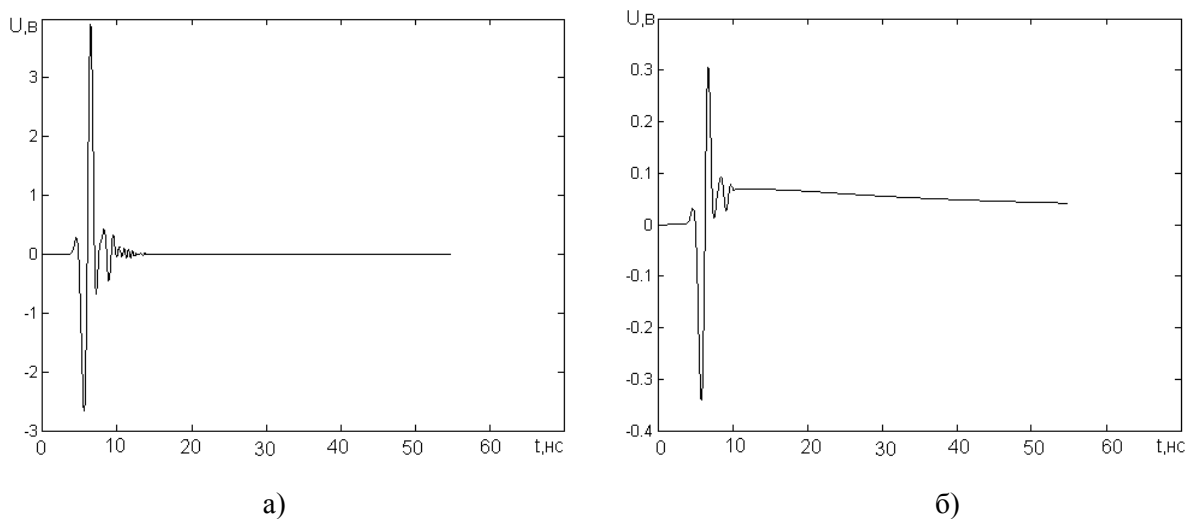


Рис. 3. Форма импульса в грунте:

а – песок с $\epsilon \approx 10$, $\sigma \approx 0,0001$ См/м, б – суглинок с $\epsilon \approx 16$, $\sigma \approx 0,02$ См/м.

Длинный «хвост» от верхних границ проводящих слоев может в этом случае маскировать сигналы от нижних границ, если цифровой тракт приемника георадара не имеет достаточного количества уровней квантования по амплитуде. Один из возможных выходов из этой ситуации – переход на более короткий импульс зондирования, для которого реализуется «высокочастотный» механизм распространения, когда «хвосты» не возникают. Для решения практических задач инженерной геологии целесообразно использовать комплект резонансных компрессоров с различными значениями центральной рабочей частотой.

Заключение

Использование эффекта резонансной компрессии увеличивает энергетический потенциал радаров подповерхностного зондирования. В метровом и дециметровом диапазоне длин волн увеличение энергетического потенциала на 20-28 дБ приводит к существенному

увеличению глубины обнаружения объектов благодаря относительно небольшому затуханию сигналов. В сантиметровом диапазоне длин волн, применение эффекта резонансной компрессии оправдано, когда необходимо достигнуть наилучших вероятностных характеристик обнаружения объекта, расположенного на небольшой глубине песочного грунта, например, в случае обнаружения мин. Формирование излученного сигнала и его прохождение в почвогрунтах в значительной степени зависит от электрофизических свойств укрывающей среды и выбранного диапазона частот.

Литература

1. 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.
2. Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984 г., стр.68
3. Подповерхностная радиолокация/ М.И.Финкельштейн, В.И.Карпухин, В.А.Кутев, В.Н.Метелкин; под ред.М.И.Финкельштейна.-М.:Радио и связь, 1994.-216с.
4. Ю.Г.Юшков, Н.Н.Бадулин, А.П.Бацула, А.И.Мельников, С.А.Новиков, С.В.Разин, Е.Л.Шошин. Наносекундный радиолокатор с временной компрессией СВЧ-импульсов передатчика. Электромагнитные волны & электронные системы, №6, т.2, 1997, с.71-76
5. Чумерин П.Ю., Слинко В.Н., Ваулин В.А., Ховаев А.Ю. Формирование сверхширокополосного импульсного излучения метрового диапазона длин волн методом резонансной компрессии. // Изв. Высших учебных заведений. Физика. - 2007, №10/3 С.110-112.
6. 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.
7. Новиков С.А., Разин С.В., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Получение мощных сверхширокополосных радиоимпульсов с помощью резонансных формирователей // Письма в ЖТФ. – 1991. Т. 17. - В.13. С.37- 39.
8. P.Yu.Chumerin, A.N.Didenko, S.A.Novikov, Yu.G.Yushkov Resonant pulse compression as an effective method for generation of UWB high repetitive microwave pulses Proc. of UWB SP6 (AMEREM-2002) USA, Annapolis 3-9 June, 2002 New-York, Publishing 2003. P.427-437.

9. Формирователь импульсов. Ваулин В.А., Слинко В.Н., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Патент на полезную модель № 83375 от 10.11.2008 г.

10. Копейкин, В.В. Обратная задача георадиолокации [Web-ресурс]/Режим доступа: <http://www.radar-stv.narod.ru> .-Загл. с экрана



Шошин Евгений Леонидович, родился в 1961г. в г. Томске, в 1985г. окончил обучение в ТАСУР по специальности "Радиоэлектронные устройства", в 1996г. защитил кандидатскую диссертацию, место работы - Сургутский государственный университет, научные интересы - радиолокация, цифровая связь, приборостроение.



Чумерин Павел Юрьевич, родился в 1958г., в 1982г. окончил Томский институт систем управления и радиоэлектроники, 2011г. защитил докторскую диссертацию, место работы Физико-технический институт Томского политехнического университета, область научных интересов: мощная СВЧ электроника, техника СВЧ.



Юшков Юрий Георгиевич, родился в 1937г., в 1960г. окончил Томский политехнический институт, в 1990г. защитил докторскую диссертацию, место работы Физико-технический институт Томского политехнического университета, область научных интересов: техника и электроника СВЧ, генерация сверхмощных импульсов излучения.