

Георадар с повышенной разрешающей способностью. Структура и пути аппаратной реализации

Олег GERМАНОВИЧ,
д. т. н., профессор
Виктор ЛИФЕРЕНКО,
д. т. н., профессор
Игорь КАЦАН,
к. т. н.
Мырза-Бек ТЕБУЕВ

Сверхширокополосная радиолокация (СШП РЛ) за последние десятилетия достигла существенных успехов. Радиолокаторы подповерхностного зондирования (РЛПЗ) (георадары) находят широкое применение при неразрушающем контроле объектов различного назначения и выпускаются серийно как российскими, так и зарубежными компаниями. Область применения георадаров постоянно расширяется [1]. Одновременно с этим непрерывно растут требования, предъявляемые к качественным показателям и характеристикам георадаров.

С практической точки зрения наиболее важными параметрами георадара являются глубина зондирования и разрешающая способность. Для оценки максимальной глубины зондирования используют следующее соотношение, приведенное в работе [5]:

$$H_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_{\text{пд}} G^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 P_{\text{ш}}}} \times \exp^{-0,115 H_{\max} \Gamma}, \quad (1)$$

где Γ — затухание в среде, дБ/м; $P_{\text{пд}}$ — импульсная мощность излучения передатчика, Вт; λ — длина волны, м; $\sigma_{\text{ц}}$ — ЭПР цели, м²; G — коэффициент усиления антенны; $P_{\text{ш}}$ — мощность шума, приведенная ко входу приемника, Вт.

Это соотношение получено для узкополосного синусоидального сигнала (поэтому используется параметр λ) при условии, что радиолокатор работает в дальней зоне.

Если же георадар работает в ближней зоне, то для этого случая нет решения уравнения Максвелла. Однако в первом приближении можно использовать приведенное соотношение, заменив длину волны λ на $c/2\tau_{\text{ц}}$, где $\tau_{\text{ц}}$ — длительность импульса.

Как следует из (1), возможные пути увеличения глубины зондирования ограничены. Так, увеличение H_{\max} за счет длины волны λ нецелесообразно, поскольку приводит к существенному снижению разрешающей способности георадара, а возможности увеличения глубины зондирования за счет повышения мощности передатчика в настоящее время практически исчерпаны и малоэффективны.

В этой связи увеличение глубины зондирования без ухудшения разрешающей спо-

собности георадара, на наш взгляд, может идти только в направлении уменьшения мощности шума, приведенного к входу приемного устройства СШП РЛС.

Действительно, задача приемного устройства РЛС с СШП-радиосигналами состоит в приеме, усилении и регистрации изменений во времени напряженности электромагнитного поля, рассеянного зондируемым объектом. Поэтому приемные устройства РЛС с импульсными СШП-радиосигналами по структуре представляют собой линейный широкополосный усилитель. При этом необходимая ширина полосы пропускания усилителя должна соответствовать ширине спектра зондирующего СШП сигнала РЛС, которая в сантиметровом диапазоне длин волн достигает величины в несколько гигагерц.

Широкополосный усилитель, располагаемый на входе приемного устройства, по существу определяет приведенный к входу уровень шумов всего приемного устройства. Если полагать, что коэффициент усиления широкополосного усилителя постоянен во всем диапазоне частот, то мощность шума, приведенная к входу приемного устройства, приближенно можно оценить так:

$$P_{\text{ш,пр}} \cong N_0 \Delta f_{\text{сшп,рлс}} \quad (2)$$

где N_0 — спектральная плотность шума, приведенная к входу приемного устройства; $\Delta f_{\text{сшп,рлс}}$ — полоса пропускания усилителя СШП РЛС.

Мощность шума $P_{\text{ш,пр}}$ весьма значительна вследствие требуемой большой полосы пропускания $\Delta f_{\text{сшп,рлс}}$ и, если не прибегать к специальным мерам, то единственный оче-

видный путь снижения $P_{\text{ш,пр}}$ состоит в применении в приемном устройстве георадара широкополосных усилителей с минимально возможной шумовой температурой $T_{\text{ш}}$.

Обычно в СВЧ-диапазоне в качестве широкополосных усилителей приемных устройств применяются ЛБВ с коэффициентом шума порядка 3–5 дБ, что соответствует $T_{\text{ш}} \approx 500\text{--}1000$ К. Применение ЛБВ в качестве широкополосных усилителей СВЧ-диапазона на частоте порядка 10 ГГц при полосе пропускания $\Delta f \approx 5$ ГГц дает $P_{\text{ш,пр}} \approx 10^{-10}$ Вт, что на 4–5 порядков хуже соответствующего показателя для традиционных (узкополосных) РЛС.

Следует отметить, что поскольку дальнейшее снижение коэффициента шума ЛБВ менее этих значений крайне проблематично, то они являются пороговыми для широкополосных усилителей СВЧ-диапазона в СШП РЛС. Приведенные оценочные расчеты показывают, что снижение $P_{\text{ш,пр}}$ может быть достигнуто, по-видимому, только за счет применения фильтра, согласованного с принимаемым сигналом. Однако эти, казалось бы, очевидные соображения не являются бесспорными. Существует мнение [2, 3], не подтвержденное ни экспериментом, ни теорией, что согласованная фильтрация может разрушить форму сигнала, содержащую информацию о геометрических параметрах объекта.

Авторы этой статьи рассматривают, как с помощью согласованной фильтрации в георадарах увеличить глубину зондирования и повысить их разрешающую способность. Реализация модернизированного георадара и его практическое использование позволит дать ответ на вопрос, в какой степени эффективна согласованная фильтрация, какие

ошибки и погрешности она вносит и существенно ли потеря информации о параметрах изучаемого объекта при ее применении.

При построении структуры модернизированного приемного устройства СШП РЛ необходимо учесть, что как излучаемый, так и в особенности отраженный сигнал являются сложными по форме СШП-сигналами СВЧ-диапазона.

Рассмотрим основные пути реализации согласованной фильтрации, обеспечивающей повышение разрешающей способности и глубины подповерхностного зондирования георадара.

Согласованный фильтр может быть реализован на основе линейной параметрической колебательной системы. При этом сигнал накачки параметрического избирательного фильтра необходимо синтезировать с таким расчетом, чтобы согласованный фильтр мог выделить сложный сигнал, поступающий на вход приемного устройства георадара. Иными словами, процедура обработки отраженного от объекта сигнала в модернизированном приемном устройстве георадара должна использовать структуру самого принимаемого отраженного сигнала для формирования сигнала накачки. Поскольку отраженный сигнал априори неизвестен, то настройке параметрического избирательного фильтра СВЧ-диапазона (формированию сигнала накачки) должна предшествовать процедура предварительного, по меньшей мере приближенного определения отраженного от объекта сигнала, поступающего в приемное устройство георадара.

Это требование может быть выполнено путем использования в составе модернизированного приемного устройства дополнительного приемного устройства классической (без согласованного фильтра) структуры. При этом практическая реализация процедуры синтеза сигнала накачки должна быть основана на следующих отправных положениях:

- Сигнал накачки формируется как набор синусоид частот, кратных частоте излучаемого передатчиком сигнала, амплитуды и фазы, которые определяются сигналом, подлежащим фильтрации, согласно алгоритму, описанному в [4].
- Частота следования импульсов, излучаемых передатчиком и принимаемых приемником, совпадает.

Таким образом, в модернизированном георадаре на основе сигнала, получаемого с выхода приемного устройства классической структуры, сначала формируется сигнал накачки параметрического избирательного фильтра СВЧ-диапазона [4] и затем уже повторно выполняются измерения параметров изучаемого объекта с помощью приемного устройства на основе согласованного фильтра. Эти измерения должны дать более ясную, четкую и детальную информацию об изучаемом объекте.

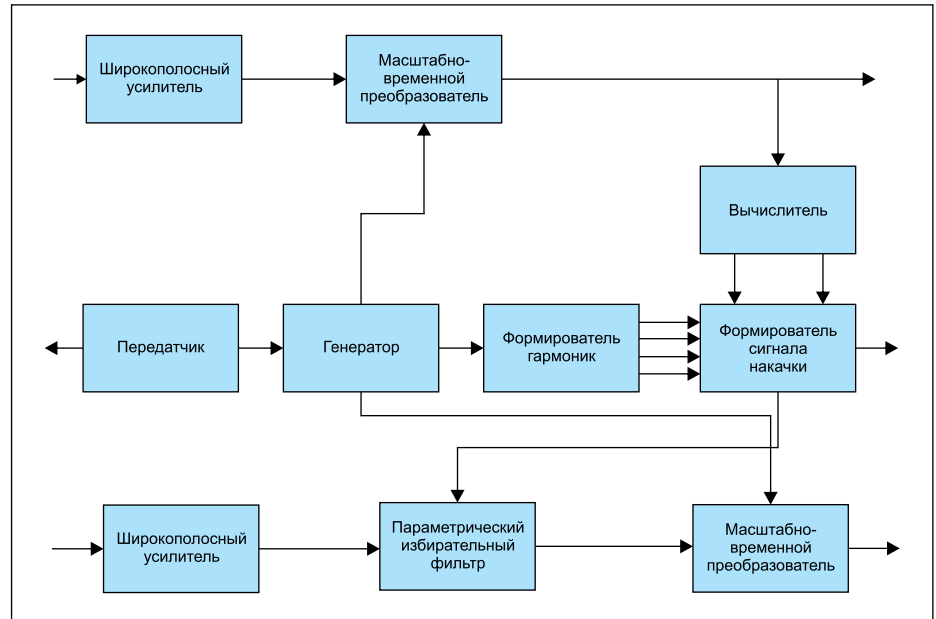


Рисунок. Структурная схема модернизированного приемного устройства георадара

На рисунке приведена структурная схема модернизированного приемного устройства георадара.

Рассмотрим назначение и особенности аппаратной реализации отдельных блоков структурной схемы модернизированного приемного устройства георадара.

Как следует из структурной схемы, представленной на рисунке, организация сигнала накачки осуществляется по следующему алгоритму.

Сигнал с выхода масштабного преобразователя приемного устройства георадара, организованного по классической схеме, поступает на вычислитель. Вычислитель представляет собой микро-ЭВМ, которая по алгоритму, описанному в [4], осуществляет вычисление амплитуд и фаз гармоник сигнала накачки. С выхода вычислителя сигнал поступает на формирователь сигнала накачки, на который одновременно подается сигнал с формирователя гармоник сигнала накачки. Формирователь представляет собой систему резонаторов, на которые поступает сигнал с генератора импульсов передатчика. Формирователь сигнала накачки — это система управляемых аттенуаторов и фазовращателей СВЧ-диапазона, назначение которых — обеспечить организацию, управление и контроль сигнала накачки. С выхода формирователя сигнал накачки поступает на параметрический согласованный фильтр СВЧ-диапазона, где используется для управления параметрами согласованного фильтра. Формирователь сигнала накачки — это наиболее ответственный и сложный блок модернизированного приемного устройства георадара. Его организация связана с решением значительного количества сложных инженерных задач и поэтому требует отдельного рассмотрения.

Параметрический избирательный фильтр СВЧ-диапазона конструктивно можно реализовать различными способами. На наш взгляд, наиболее простым решением здесь может служить применение одномерных, пространственно однородных волновых систем (ОВС) с нестационарными условиями на одной из границ. Такой параметрический фильтр СВЧ-диапазона в качестве основного элемента содержит пространственно однородную автономную ОВС без дисперсии. Примером таких ОВС служат коаксиальные ВС, симметричные полосковые линии и другие подобные структуры.

Рассмотрим теперь практически важный вопрос о создании нестационарных краевых условий для указанного выше класса ОВС. По существу, изучаемый класс линейных параметрических колебательных систем с распределенными параметрами (ЛПКС с РП) представляет собой устройства, состоящие из стационарной колебательной системы, выполненной в нашем случае на основе отрезка пространственно однородной автономной ОНС, в которой за счет создания периодических краевых условий осуществляется эффективное управление частотой собственных колебаний этой стационарной колебательной системы. Для достижения параметрического эффекта частота управления (частота накачки) должна иметь порядок частоты собственных колебаний стационарной системы, и, кроме того, при такого рода периодическом управлении частотой собственных колебаний должны соблюдаться определенные требования.

Наиболее существенными из них являются:

- Независимость параметров элементов ЛПКС с РП, управляющих частотой собственных колебаний системы, от поля селектируемого сигнала.

- Возможность достижения требуемого диапазона изменения частоты собственных колебаний ЛПКС с РП.
- Обеспечение возможности воздействия на управляющий элемент полей накачки без нарушения структуры полей (характеристик, параметров) ОВС, на базе которой организована ЛПКС с РП.

Перечисленные требования на практике удается удовлетворить с определенной степенью точности.

Существующие в настоящее время методы организации периодических краевых условий можно условно разделить на две категории:

- К первой относятся методы организации периодических краевых условий на границах ОВС, основанные на применении электронных схем с квазисосредоточенными активными и пассивными элементами. Такие способы организации периодических краевых условий осуществимы в низкочастотной части СВЧ-диапазона (от сотен мегагерц до единиц гигагерц).
- Ко второй категории относятся методы организации периодических краевых условий на границах ОВС, основанные на применении управляемых активных элементов (материалов), изменяющих свои свойства (например, диэлектриче-

скую или магнитную проницаемость) под действием сторонних электромагнитных полей, частота которых на несколько порядков выше частоты накачки. Сигнал управления накачки выступает при этом в качестве сигнала, которым промодулировано стороннее электромагнитное поле. Этот способ организации периодического краевого условия является предпочтительным и пригоден во всем СВЧ-диапазоне частот, где применимы ЛПКС с РП.

Одним из наиболее перспективных направлений в деле создания ЛПКС с РП СВЧ-диапазона является использование в резонаторах в качестве активных элементов диэлектриков с управляемой диэлектрической проницаемостью. Применение активных диэлектриков позволяет решить весь комплекс проблем, связанных с необходимостью удовлетворения указанных выше специальных условий, обеспечивающих возможность практической реализации ЛПКС с РП. Несмотря на кажущееся, на первый взгляд, существенное усложнение конструкции ЛПКС с РП, возрастание технологических трудностей и подорожание прибора, применение новых активных материалов представляется многообещающим, естественным и перспективным для СВЧ-техники.

Подводя итог рассмотрению возможности применения линейных параметрических колебательных систем (ЛПКС) СВЧ-диапазона в георадарах для построения согласованных фильтров, следует подчеркнуть, что ЛПКС наиболее эффективны при построении согласованных фильтров для узкополосных сигналов. По мере увеличения полосы сигнала, подлежащего фильтрации, возрастает сложность структуры сигнала накачки и, как следствие, сложность аппаратной реализации ЛПКС. ■

Литература

1. Вопросы подповерхностной радиолокации: Монография. Под ред. А. Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2000.
2. Астанин Л. Ю., Костылев А. А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. М.: Радио и связь, 1994.
3. Финкельштейн М. И., Карпунин В. И., Кутев В. А., Метелкин В. Н. Подповерхностная радиолокация. М.: Радио и связь, 1994.
4. Германович О., Кацан И., Парантаев Г. Синтез параметрического избирательного фильтра СВЧ-диапазона // Компоненты и технологии. 2007. № 11.
5. Дудник А. В. Влияние излучаемой мощности на глубину зондирования георадиолокации // Разведка и охрана недр. 2008. № 1.