

другие циклы работы бетатрона: «45 минут нагрев – 15 минут охлаждение»; «15 минут нагрев – 15 минут охлаждения».

Таким образом, используя формулы (3) стало возможным произведения расчета теоретических параметров. При наличии экспериментальных данных температур перегрева на двух частотах, возможно произвести максимальную частоту бетатрона МИБ-7,5/4, при которой будет обеспечена его достаточно длительная надежная работа. Полученные данные позволяют более глубоко исследовать температурные режимы бетатрона, в частности, определить температуры при других временных циклах «нагрев-охлаждение» и, возможно, оптимизировать эти циклы с целью уменьшения максимальной температуры.

Список литературы:

[1] Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н. *Тепловые режимы электронной аппаратуры. Учебное пособие для студентов высших технических заведений. «Энергия», 1971. С 248.*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАДАРА ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С КОММУТИРУЕМОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ

*Балзовский Евгений Владимирович, Буянов Юрий Иннокентьевич
Национальный исследовательский Томский государственный университет
tduty5@mail.ru*

Использование радаров подповерхностного зондирования для исследования автодорог позволяет диагностировать скрытые дефекты и вовремя предотвращать повреждения дорожного полотна. Несмотря на существование готовых технических решений и приборов, невысокая скорость сканирования при движении и высокая цена на зарубежные изделия являются препятствиями для внедрения таких устройств. При создании отечественного сканера автодорог могут быть применены алгоритмы радиовидения объектов, скрытых за непрозрачными препятствиями [1, 2]. Облучение поверхностного слоя и нижележащих слоев дорожной одежды сверхширокополосными (СШП) импульсами наносекундной длительности обеспечивает высокое пространственное разрешение, а наличие энергии в низкочастотной части спектра – проникающую способность. Из-за увеличения потерь в среде с ростом частоты, для увеличения глубины зондирования используются СШП импульсы, спектр которых смещен в область низких частот и занимает полосу 0,5–2 ГГц. Для построения радиоизображения неоднородностей дорожного полотна синтезируется апертура перемещением приемно-передатчика радара вдоль дороги, а для увеличения ширины сканируемой полосы используется матрица антенн, последовательно подключаемых к генератору или приемному устройству [3].

Элемент антенной решетки георадара выполнен по технологии комбинированных антенн [4], представляет собой совокупность излучателей электрического и магнитного типов, имеет малые электрические размеры и слабо меняющиеся характеристики направленности и входной импеданс в полосе частот 0,5–4 ГГц [5, 6]. На пластине стеклотекстолита (1–4 на *рис. 1*) размером 110×110×1 мм, закрепленной в алюминиевом уголке 5 сечением 120×120 мм длиной 0,6 м, печатным способом выполнен излучатель электрического типа 6, а свободный от металла участок платы 7 является излучателем магнитного типа. Амплитудно-фазовые соотношения для возбуждения излучателей обоих типов определяются размерами участка 7 и целевой линии 8.

Моделирование антенного элемента и антенных решеток проведено в программном продукте CST Studio Suite с академической лицензией. Расчетный и измеренный коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) одиночного элемента не превышает величины КСВН = 2 в диапазоне частот 0,6–4,3 ГГц. В диапазоне до 2 ГГц результаты расчетов и измерений практически совпадают, на более высоких частотах расхождение зависимостей КСВН может быть связано с тем, что потери в материалах антенны при моделировании учтены недостаточно точно. КСВН антенн в составе решетки ухудшается в области низких частот. Нижняя граница полосы согласования по уровню КСВН = 2 поднимается до 0,78 ГГц.

Проведено моделирование приемной и передающей антенных решеток, расположенных над диэлектрическим слоем, геометрия задачи представлена на *рис. 2*. Антенный элемент 1 возбуждается биполярным импульсом напряжения длительностью 0,4 нс, элементы 2–4 регистрируют отраженные импульсы при наличии пластины 5 толщиной 150 мм с дисперсионными свойствами, соответствующими сухому бетону: диэлектрическая проницаемость равна 5,5–6 на частотах до 4 ГГц, тангенс угла диэлектрических потерь имеет величину до 0,25 на частоте 1 ГГц. Выявлено, что направленные свойства

антенн слабо зависят от расстояния до диэлектрического слоя при высоте расположения антенн 100–300 мм над слоем. При указанных расстояниях КСВН антенн увеличивается до величины не более чем 2,5 в диапазонах частот 1,5–1,8 ГГц и 2,6–2,9 ГГц. В градациях серого цвета на рис. 2 показана картина распределения модуля электрического поля на частоте 2 ГГц. Расчеты показали, что на частотах 1–2,5 ГГц вдоль верхней границы раздела воздух-диэлектрик возбуждается поверхностная волна, которая приводит к паразитному излучению в верхнее полупространство под углом 30–50 градусов к поверхности диэлектрической пластины с интенсивностью до 0,5 от максимальной интенсивности волны, излучаемой в нижнее полупространство.

Расчет взаимного влияния элементов решетки проведен при наличии диэлектрического слоя. Частотная зависимость модуля коэффициента передачи $|S_{21}|$ от антенного элемента 1 (рис. 2) к элементу 2 и $|S_{31}|$ к элементу 3 приведена на рис. 3. Наибольшее влияние друг на друга оказывают соседние элементы, например 1 и 2, а также 1 и 4. При наличии диэлектрического слоя $|S_{21}|$ имеет выраженный максимум в диапазоне частот 1,5–1,8 ГГц, точное положение максимума зависит от расстояния между антенной решеткой и слоем. Если в численной модели задать свойства диэлектрического слоя, соответствующие воздуху (аналогично отсутствию диэлектрика), то уровень взаимодействия между элементами 1 и 2 в этом диапазоне уменьшается на 6–8 дБ. Влияние поля излучения элемента 1 на элемент 3 и более дальние значительно меньше. Можно предположить, что применение объемного поглощающего материала позволит уменьшить взаимное влияние элементов антенных решеток.

Разработана и исследована сверхширокополосная антенная решетка, предназначенная для использования в радаре подповерхностного зондирования. Антенные элементы согласованы с 50-омным фидерным трактом в полосе 0,8–4 ГГц, имеют выраженные направленные свойства. Несмотря на близкое расположение элементов в решетке, уровень взаимного влияния элементов не является критическим. Разработанная антенная решетка может быть использована как при возбуждении короткими СШП импульсами, так и при частотном сканировании в диапазоне 0,8–3 ГГц.

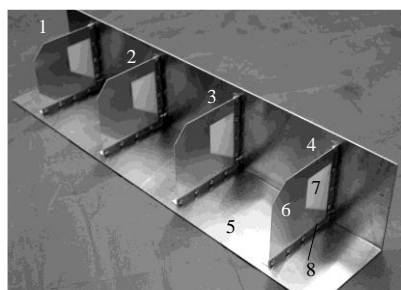


Рис. 1. Антенная решетка

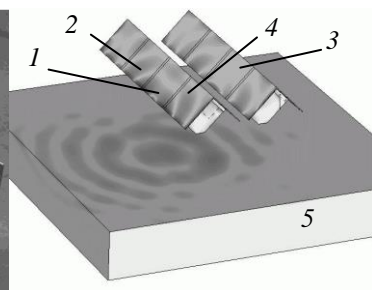


Рис. 2 Зондирование слоя

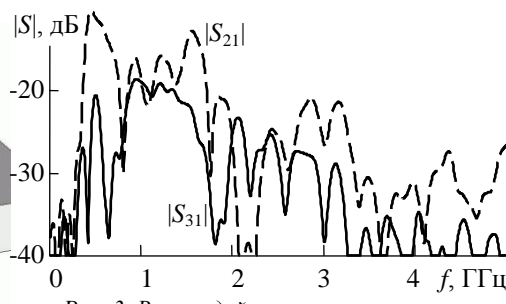


Рис. 3. Взаимодействие антенных элементов

Список литературы:

- [1] Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая томография: достижения и перспективы. Томск: НТЛ, 2014. 262 с.
- [2] Shipilov S.E., Satarov R.N., Fedyanin I.S., Balzovsky E.V., Yakubov V.P. // MATEC Web of Conferences, 2016. Vol. 79. Article No. 01079. P. 1.
- [3] Satarov R.N., Kuzmenko I.Y., Muksunov T.R., et. al. // Rus. Phys. J. 2013. V. 55. No. 8. P. 884.
- [4] Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. Новосибирск: Наука, 2015. 483 с.
- [5] Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Люлякин А.П. Планарная СШП антенна для связи и радиолокации //24-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь, 2014. Том I. С. 547.
- [6] Balzovsky E.V., Buyanov Y.I. // MATEC Web of Conferences, 2016. Vol. 79. Article No. 01036. P. 1.

ВИХРЕТОКОВЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ЛЕГКОСПЛАВНЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

Белянков Василий Юрьевич, Гольдштейн Александр Ефремович
 Национальный исследовательский Томский политехнический университет
 Гольдштейн Александр Ефремович
 vasyatpu@gmail.com