

РАДИОТЕХНИКА

Radioengineering XXI век

1 2016

В номере:

Уравнение временного баланса сетевой радиолокационной системы

Построение апертурных антенн с частотно-независимыми характеристиками излучения

Перспективы применения миллиметровой радиолокации для получения высокодетальных радиоизображений космических объектов

и др.



тел./факс: (495) 625-9241
e-mail: info@radiotec.ru
<http://www.radiotec.ru>

РАДИОТЕХНИКА

Включен в перечень ВАК **XXI век**

Radioengineering



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.П. Андрианова, д.т.н., проф. П.А.Бакулев, д.ф.-м.н., проф. О.В. Бецкий, д.т.н., проф. А.В. Богословский, д.г.н., проф. Р.П. Быстров, д.т.н., проф. В.С. Верба, д.т.н., проф. В.В. Витязев, д.т.н., проф. Э.А. Засовин, д.т.н., доцент А.В. Иванов, д.т.н., проф. В.А. Каплун, д.т.н., проф. Ю.Л. Козирацкий, д.ф.-м.н., проф. А.Г. Козорезов (Великобритания), к.ф.-м.н., с.н.с. В.В. Колесов (зам. главного редактора), д.ф.-м.н., проф. И.Н. Компанец, д.т.н., проф. Г.С. Кондратенков, д.т.н., проф. А.В. Коренной, д.ф.-м.н., проф. Б.Г. Кутуза, д.т.н., проф. В.И. Меркулов, д.т.н., проф. В.П. Мещанов, д.т.н., проф. В.А. Обуховец, д.т.н., проф. А.И. Перов, д.ф.-м.н. В.П. Плесский (Швейцария), д.ф.-м.н., проф. В.В. Проклов, акад. РАН В.И. Пустовойт, д.т.н., проф. В.Г. Радзиевский, д.т.н., проф. Е.М. Сухарев, д.т.н., проф. Е.Ф. Толстов, д.т.н., проф. В.Н. Ушаков, д.т.н., проф. В.Е. Фарбер, акад. РАН И.Б. Фёдоров, д.т.н., проф. Ю.С. Шинаков, в.н.с. Энрико Верона, д.т.н., проф. С.В. Ягольников, д.т.н., проф. М.С. Ярлыков.

Главный редактор
академик РАН
Ю. В. Гуляев

EDITORIAL BOARD:

L.P. Andrianova, Academician RAS I.B. Fedorov, Academician RAS V.I. Pustovoit, Dr.Sc. (Eng.), Prof. P.A. Bakulev, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. O.V. Betskii, Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.V. Bogoslovskii, Dr.Sc. (Eng.), Prof. R.P. Bystrov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.Ye. Farber, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.A. Kaplun, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. I.N. Kompanets, Dr.Sc. (Eng.), Prof. G.S. Kondratenkov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.V. Korennoi, Dr.Sc. (Eng.), Prof. Yu.I. Koziratskii, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. A.G. Kozorezov (Great Britain), Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. B.G. Kutuza, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.I. Merkulov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.P. Meshchanov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.A. Obukhovets, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.P. Plessky (Switzerland), Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.I. Perov, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. V.V. Proklov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.G. Radzievskii, Dr.Sc. (Eng.), Prof. Yu.S. Shinakov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. Ye.M. Sukharev, Dr.Sc. (Eng.), Prof. Ye.F. Tolstov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.N. Ushakov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.S. Verba, Dr.Sc. (Eng.), Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.V. Vityazev, Dr.Sc. (Eng.), Prof. S.V. Yagolnikov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. M.S. Yarlykov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. E.A. Zasovin, Dr.Sc. (Eng.), Associate Prof. A.V. Ivanov, associate researcher Enrico Verona, Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist V.V. Kolesov (Deputy Editor).

Editor-in-Chief,
Academician RAS,
Yu.V. Gulyaev

Редактор выпуска – д.т.н., ген. конструктор системы РЭБ Ю.И. Маевский

Содержание

№ 1 январь 2016 г.

От редактора выпуска
Маевский Ю.И.

4

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Уравнение временного баланса сетевой радиолокационной системы

Баринов С.П., Гриб В.Н., Насенков И.Г., Маевский Ю.И.

5

Влияние многоточечных коррелированных помех на эффективность функционирования сетевой радиолокационной системы

Баринов С.П., Гриб В.Н., Маевский Ю.И.

18

Модульная технология VPX в технике РЭБ

Маклашов В.А.

28

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Технические аспекты оптимизации построения высокоточных радиопеленгаторов

Потапова Т.П., Топорков Н.В.

32

Расчет коэффициентов связи в плоской антенной решетке Ван-Атта

Горин А.М., Самарский С.Г.

39

Построение апертурных антенн с частотно-независимыми характеристиками излучения

Бобков Н.И., Габриэльян Д.Д., Ивакина С.С., Пархоменко Н.Г.

42

Выбор частотного диапазона всепогодных радиопотонных АФАР

Зайцев Д.Ф., Кортнев В.П., Мордасов Д.В.

49

Моделирование модулятора на микрорезонаторах с модами шепчущей галереи Зайцев Д.Ф., Павлов Н.Г., Кондратьев Н.М., Городецкий М.Л.	57
--	----

ОБРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ

Применение монобитной технологии обработки радиосигналов в информационном конфликте в спектре электромагнитных волн Карманов Ю.Т., Николаев А.Н., Мазуров Ю.В., Поваляев С.В.	66
Классификация радиотехнических объектов на принципах адаптации архива радиоэлектронных средств к текущей радиоэлектронной обстановке Шпак В.Ф., Гетманчук А.В.	72
Результаты экспериментальных исследований признаков классификации малоразмерных воздушных объектов в мультистатистических системах скрытной радиолокации Беляев Г.Г., Макеев А.А., Чернятьев Ю.Н., Шевченко В.Н.	78

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН И ТЕХНИКА СВЧ

Аналитическое решение совместной внутренней краевой задачи электродинамики и теплопроводности для прямоугольного резонатора, частично заполненного диэлектрическим материалом Баринов Д.А., Коломейцев В.А., Посадский В.Н., Семёнов А.Э.	88
Распределение электрического поля собственных типов колебаний прямоугольного резонатора с двухслойным диэлектрическим заполнением Коломейцев В.А., Кузьмин Ю.А., Лукьянов М.А., Семёнов А.Э.	98
Исследование чувствительности параметров малошумящих усилителей к перепадам температуры Вьюгинов В.Н., Гудков А.Г., Зыбин А.А., Шаганов П.А., Видякин С.И.	107
МИС СВЧ-переключатель на SiC pin-диодах Вьюгинов В.Н., Гудков А.Г., Видякин С.И., Кузьмичев Ю.С.	110

ПРОБЛЕМЫ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Перспективы применения миллиметровой радиолокации для получения высокодетальных радиоизображений космических объектов Федоров И.Б., Слукин Г.П., Нефедов С.И.	113
--	-----

АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ: ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Сравнение рекуррентных алгоритмов быстрого поиска в системах с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты Султанов Б.В., Жукова Н.Б., Зефиоров С.Л., Дорошкевич В.В.	119
Квазиоптимальная обработка сигналов на фоне аддитивной и мультипликативной негауссовских помех Артюшенко В.М., Воловач В.И.	129

ИНФОРМАЦИЯ

95 лет Военно-воздушной инженерной академии имени профессора Н.Е. Жуковского	131
--	-----

Contents

№ 1 January 2016

From Editor Majewski Yu.I.	4
-------------------------------	---

RADIO ENGINEERING SYSTEMS

Time balance equation for a network radar system Barinov S.P., Grib V.N., Nasenkov I.G., Majewski Yu.I.	17
On the influence of multipoint correlated jamming on effectiveness of network radar performance Barinov S.P., Grib V.N., Majewski Yu.I.	26
Modular processing VPX in EW-equipment Maklashov V.A.	31

RADIO ENGINEERING DEVICES

Technical aspects of construction optimization of high-precision direction finders Potapova T.P., Toporkov N.V.	38
--	----

Calculation of coupling coefficients for the van Atta planar antenna array Gorin A.M., Samarsky S.G.	41
The design of aperture antennas with frequency independent radiation characteristics Bobkov N.I., Gabrielyan D.D., Ivakina S.S., Parkhomenko N.G.	47
Selecting the frequency range of all-weather AESA Zaitsev D.F., Kortnev V.P., Mordasov D.V.	56
Modeling the whispering gallery microresonator based optical modulator Zaitsev D.F., Pavlov N.G., Kondratev N.M., Gorodetsky M.L.	65

WIDEBAND SIGNAL PROCESSING

Application monobit signal processing technology in the information conflict in the electromagnetic spectrum Karmanov Yu.T., Nikolaev A.N., Mazurov Yu.V., Povalyaev S.V.	70
Radio technical objects classification on principles of radio electronic means archive adaptation to a current radio electronic environment Shpak V.F., Getmanchuk A.V.	77
Results of experimental studies for small aircrafts classification attributes in the hide multistatic radars Belyaev G.G., Makeev A.A., Chernyatiev Yu.N., Shevchenko V.N.	87

RADIO-WAVE PROPAGATION AND MICROWAVE ENGINEERING

The analytical solution of the joint inner boundary problem of electrodynamics and thermal conductivity for a rectangular cavity partially filled with a dielectric material Barinov D.A., Kolomeitsev V.A., Posadsky V.N., Semenov A.E.	97
Distribution of electric field of own types of fluctuations of the rectangular resonator with two-layer dielectric filling Kolomeitsev V.A., Kuzmin Yu.A., Lukyanov M.A., Semenov A.E.	105
The investigation of sensitive parameters of a low noise amplifier to the temperature changes Вьюгинов В.Н., Гудков А.Г., Зыбин А.А., Шаганов П.А., Видякин С.И.	109
Microwave monolithic integrated circuit switches on the SiC pin diodes Вьюгинов В.Н., Гудков А.Г., Видякин С.И., Кузьмичев Ю.С.	112

PROBLEMS AND CONSTRUCTION PRINCIPLES OF RADIO ENGINEERING SYSTEMS

Prospects for the use of millimeter radar to produce highly detailed radio images of space objects Fedorov I.B., Slukin G.P., Nefedov S.I.	118
--	-----

FUNCTIONAL ALGORITHMS: SIGNAL TRANSMISSION, RECEPTION AND PROCESSING

Comparison of recurrent fast acquisition algorithms in frequency hopping systems Sultanov B.V., Zhukova N.B., Zefirov S.L., Doroshkevich V.V.	123
Quasi-optimal signal processing with the background of additive and multiplicative non-Gaussian noise Artyushenko V.M., Volovach V.I.	124

Все статьи, представленные в данном выпуске журнала, соответствуют номенклатуре специальностей научных работников (Приказ Минобрнауки РФ от 11.08.2009 № 294) по отраслям физико-математических, технических и химических наук.

"Radiotekhnika" (Radioengineering) is the leading scientific and technical journal in Russia. It covers wide spectrum of problems in priority areas of the development in communication, radar, navigation, and radioelectronics. Established in 1937.

Журнал «Радиотехника» переводится на английский язык.

Необходимую информацию Вы найдете на нашем сайте <http://www.radiotec.ru>

Свидетельство о регистрации ПИИ № ФС77-25036 от 12 июля 2006 г.

Сдано в набор 15.12.2015. Подписано в печать 20.01.2016. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Печ. л. 16,25. Тираж 600 экз. Изд. № 25.

ЗАО «Издательство «Радиотехника»: 107031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6. Тел./факс: (7-495)625-92-41, (7-495)625-78-72.

E-mail: info@radiotec.ru

Дизайн и допечатная подготовка ООО «САЙНС-ПРЕСС».

Отпечатано в ФГУП Издательство «Известия» УД ПРФ. 127254, ул. Добролюбова, д. 6.

Заказ № 395.

ISSN 0033-8486

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2016 г.

Незаконное тиражирование и перевод статей, включенных в журнал, в электронном и любом другом виде запрещено и карается административной и уголовной ответственностью по закону РФ «Об авторском праве и смежных правах»

УДК 621.396

Выбор частотного диапазона всепогодных радиофотонных АФАР

© Авторы, 2016

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2016

Д.Ф. Зайцев – д.т.н., гл. конструктор по радиофотонике,Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники (МИРЭА),
руководитель лаборатории, АО «КРЭТ»

E-mail: zaysev@yandex.ru

В.П. Кортнев – к.т.н., ст. науч. сотрудник, АО «КРЭТ»**Д.В. Мордасов** – мл. науч. сотрудник, АО «КРЭТ»

E-mail: danmordasov@gmail.com

Приведены результаты сравнительного анализа расчетной дальности обнаружения малозаметных целей в условиях атмосферных осадков по трассе в зависимости от частотного диапазона для широкополосных радиофотонных АФАР (радиооптических фазированных антенных решеток (РОФАР)) средней дальности. Показано, что в условиях атмосферных осадков значительной интенсивности по трассе распространения луча РЛС сантиметрового диапазона дальность обнаружения обычных целей существенно снижается, а для малозаметных целей дальность обнаружения падает до неприемлемо малых значений.

Ключевые слова: сравнительный анализ, всепогодность, радиофотонные АФАР(РОФАР), дальность обнаружения, малозаметные цели, нанотехнология, нанофотоника.

The results of the comparative analysis of the estimated range of detection of stealth targets in terms of precipitation on the track, depending on the frequency band for medium-range broadband radiophotonic active electronically scanned array (AESA)-(ROFAR). It is shown that in the precipitation of significant intensity of the propagation path of the beam radar centimeter range, the detection range of the common objectives is significantly reduced, and for the purpose of stealth detection range falls to unacceptably low values.

Keywords: comparative analysis, all-weather capability, AESA, ROFAR, estimated range of detection, (T/R) modules, radiophotonic, Radio Wave Absorbers, stealth targets, nanotechnology, nanophotonics.

Каждая частотная область для работы РЛС обладает присущими только ей характеристиками, которые в некоторых конкретных случаях обеспечивают ей преимущества перед другими.

Цель работы – рассмотрение характерных свойств различных участков электромагнитного спектра, применяемого в радиолокации, и описываются основные преимущества и ограничения, свойственные каждому рассматриваемому частотному диапазону.

Ограничение габаритных размеров мобильных антенн с одной стороны, и увеличение угловой разрешающей способности с другой, обусловили применение относительно коротких волн сантиметрового и миллиметрового диапазонов.

Однако в условиях земной атмосферы затухание в осадках, а также применение противорадиолокационных покрытий снижают дальность действия РЛС, работающих на $\lambda < 10$ см. Кроме того, увеличение скорости целей до гиперзвуковых привели к необходимости увеличения дальности обнаружения и захвата целей вместо десятков километров (самолетные РЛС, наземные ЗРК) до сотен километров.

Известно [1], что величина затухания сигналов в осадках существенно зависит от частотного диапазона волн. Например, для интенсивности дождя от 1 мм/ч до 16 мм/ч при длине волны $\lambda = 3$ см затухание составит величину 0,0125...0,3 дБ/км (на 100 км до 30 дБ), а при $\lambda = 10$ см менее 0,01 дБ/км (на 100 км до 1 дБ и 16 мм/ч). На $\lambda = 5$ мм даже в ясную погоду затухание составит 15 дБ/км из-за потерь в кислороде (затухание 150 дБ на 10 км). На рис. 1 приведены удельные потери L , раз/км = $F(\lambda)$.

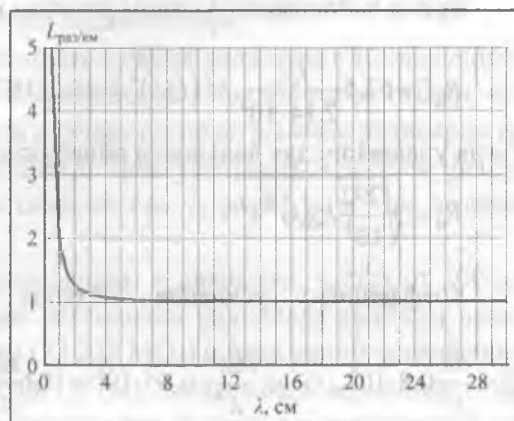


Рис. 1. График зависимости затухания L от длины волны в атмосфере при интенсивности дождя $I_d = 16$ мм/ч ($T = 20^\circ\text{C}$, $\rho = 760$ мм.рт.ст)

Таким образом, для РЛС, предназначенной работать в атмосферных условиях, длинноволновый диапазон частот предпочтительнее ($\lambda > 10$ см), т.к. обеспечит допустимые потери при распространении.

Для количественной оценки зависимости потерь распространения эхосигнала от λ в атмосфере и при покрытии радиопоглощающим материалом (РПМ) приведем расчет дальности обнаружения цели:

при ясной погоде без применения покрытий ($L_n = 0$);

при ясной погоде по цели с узкополосным радиопоглощающим покрытием ($L_{пу}$) в диапазоне частот (длин волн) от 8 ГГц (6 см) до 18 ГГц (1,7 см);

при ясной погоде по цели с широкополосным радиопоглощающим покрытием ($L_{пш}$) в полосе частот от 3,5 ГГц;

при наличии дождя интенсивностью $I_{д1} = 4$ мм/ч и $I_{д2} = 16$ мм/ч без РПМ, с узкополосным РПМ и широкополосным РПМ.

Для расчета использовалось известное соотношение [2]

$$R_{ц} = \sqrt[4]{\frac{12,6 \cdot 2P_{cp} t_0 (G\lambda)^2 \sigma_{ц}}{(с/ш)K_{ш}L}} \quad (1)$$

где $R_{ц}$ – дальность цели; P_{cp} – средняя мощность передатчика (~ 1 кВт); t_0 – время наблюдения цели в одном угловом канале; G – коэффициент усиления антенны; $\Delta\beta^0$ – сектор сканирования по азимуту $\pm 60^\circ$ ($\Delta\beta^0 = 120^\circ$); $\Delta\epsilon^0$ – сектор сканирования по вертикали: $0^\circ \dots 10^\circ$; λ – длина волны $3 \dots 30$ см; $\sigma_{ц}$ – ЭПР цели 1 м^2 ; $с/ш$ – отношение сигнал/шум -13 дБ (20 раз); $K_{ш}$ – коэффициент шума приёмника -3 дБ (2 раза); L – потери в тракте -12 дБ (16,6 раза).

Для удобства расчетов формулу (1) можно переписать, выделив частотно-зависимые параметры:

$$R_{ц} = \sqrt[4]{25 \frac{P_{cp} \sigma_{ц}}{(с/ш)K_{ш}L} t_0 (G\lambda)^2} \quad \text{или} \quad R_{ц} = \sqrt[4]{25 \frac{10^3 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ м}^2}{20 \cdot 2 \cdot 10} t_0 (G\lambda)^2}.$$

Таким образом, можно записать

$$R_{ц}^4 = 62,5 t_0 (G\lambda)^2, \quad (2)$$

где $t_0 = t_{обз}/n$; $t_{обз}$ – время обзора сектора пространства; n – число угловых положений луча РЛС ($n = f(\lambda)$, т.к. зависит от ширины диаграммы направленности РОФАР (ДНА)).

Число положений луча определяется сектором сканирования $\Delta\beta^0 \cdot \Delta\epsilon^0 = 120^\circ \cdot 10^\circ = 1200$ кв. град и «площадью» сечения луча в градусах $\text{ДНА}_{град}^\beta = \frac{75\lambda}{D_\beta} = \frac{75\lambda_{см}}{100\text{см}} = 0,75\lambda$ и $\text{ДНА}_{град}^\epsilon = \frac{75\lambda_{см}}{100\text{см}} = 0,75\lambda$.

Площадь «сечения» (углового) луча $S_\lambda = \text{ДНА}_{град}^\beta \cdot \text{ДНА}_{град}^\epsilon = 0,75^2 \lambda^2 = 0,56\lambda^2$. Число угловых положений луча будет $n = (1200 \text{ кв.град}) / (0,56\lambda^2) = 2143\lambda^{-2} = 2,14 \cdot 10^3 / \lambda^2$.

Время наблюдения в одном угловом канале будет $t_0 = \frac{t_{обз}}{n} = \frac{t_{обз}}{2,14 \cdot 10^3} \lambda^2$. Из (2) получаем

$$R_{ц}^4 = 62,5 \frac{t_{обз}}{2,14 \cdot 10^3} \lambda^2 (G\lambda)^2 = 29,2 \cdot 10^{-3} t_{обз} G^2 \lambda^4.$$

Тогда уравнение для дальности обнаружения можно записать как

$$R_{ц} = \sqrt[4]{\frac{292}{10^4} t_{обз} G^2 \lambda^4}. \quad (3)$$

Коэффициент усиления антенны будет таким: $G = \frac{4\pi S_a}{\lambda^2} \text{КИП} = \frac{4\pi}{\lambda^2} 0,8 S_a$, $S_a = 1 \text{ м}^2 = 10^4 \text{ см}^2$,

$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} 0,8 \cdot 10^4$, $G^2 = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} 0,64 \cdot 10^8 = 102 \frac{10^8}{\lambda^4}$. Подставляя выражение для G^2 в формулу для $R_{ц}^4$, получа-

ем $R_{ц}^4 = 29,2 \cdot 10^{-3} t_{обз} 102 \frac{10^8}{\lambda^4} \lambda^4$ или $R_{ц} = \sqrt[4]{\frac{292}{10^4} t_{обз} 102 \cdot 10^8} = 1304 \sqrt[4]{t_{обз}}$. Следовательно, можно записать

$$R_{ц} = 130\sqrt{t_{обз}} \quad (4)$$

Таким образом, величина $R_{ц}$ при ясной погоде и без применения радиопоглощающих покрытий не зависит от длины волны, что совпадает с утверждением известного автора [3].

Характеристики обнаружения в идеальном случае не зависят от длины волны, вида модуляции излучаемого сигнала (в том числе от длительности импульса, частоты повторения), а также от формы диаграммы направленности антенны. Влияние этих параметров проявляется в реальных радиолокационных станциях в виде определенных потерь, которые должны вводиться в уравнение дальности действия конкретной анализируемой радиолокационной станции.

Принимая максимальное время $t_{обз} = 5$ с – время обзора сектора пространства, за которое цель при гиперскорости 5М (1650 м/с) преодолевает расстояние < 10 км (строб дальности для $\Delta R = 15$ км – 100 мкс), т.е. не выходит из строба, получаем значение $R_{ц} = 130\sqrt{5} = 195$ км. Таким образом, при ясной погоде и без покрытия $R_{ц} = 195$ км.

Влияние атмосферных осадков и состава атмосферы на поглощения электромагнитной энергии исследовано в радиолокационном диапазоне частот от миллиметровых до дециметровых волн. Распространяясь в атмосфере, радиоволны ослабляются из-за потери части электромагнитной энергии, которая поглощается и рассеивается молекулами кислорода и водяного пара, атмосферными осадками, частицами пыли и другими неоднородностями атмосферы.

Явления, возникающие при работе радиолокационных средств, вследствие влияния метеорологических условий, могут быть разделены на две группы: рефракция радиоволн в тропосфере; поглощение (ослабление) радиоволн атмосферными газами и осадками

Рефракционные явления в участке спектра ниже 100 ГГц не зависят от частоты. Они оказывают большее или меньшее влияние на характеристики большинства находящихся в эксплуатации радиолокационных систем.

Рефракция относительно слабо воздействует на работу самолетных РЛС с небольшой дальностью действия, таких как РЛС управления оружием, РЛС с боковым обзором, предназначенных для радиолокационного картографирования земной поверхности и метеорологических РЛС, предназначенных для обнаружения зон, опасных для полета.

Наоборот, рефракционные явления имеют исключительно важное значение при работе обзорных РЛС дальнего обнаружения, одной из главных задач которых является определение высоты цели при малых углах места.

Поглощение радиоволн атмосферными газами начинает оказывать влияние на характеристики РЛС, работающих на частотах выше 10 ГГц. Такие РЛС обычно имеют небольшую дальность действия, так что воздействие поглощения оказывается не очень заметным, если только рабочие частоты РЛС не попадают на участки спектра вблизи линий поглощения кислорода или водяного пара.

Ослабление радиолокационного сигнала в атмосфере обусловлено двумя явлениями: поглощением и рассеянием. На волнах длиной выше нескольких сантиметров поглощение атмосферными газами, вообще говоря, оказывается пренебрежимо малым, за исключением случаев распространения радиоволн на очень большие расстояния. Однако ослабление в облаках и в дожде должно учитываться во всем диапазоне волн короче 10 см. Особенно сильно это явление сказывается на волнах длиной 1 см и 3 см, а также на еще более коротких волнах.

Основными атмосферными газами, которые поглощают радиоволны в диапазоне частот от 100 до 50 000 МГц, являются водяной пар и кислород. В этом диапазоне поглощение радиоволн наиболее велико в области линии поглощения водяным паром на волне 1,35 см (22 235 МГц) и ряда линий поглощения кислородом на волне длиной около 0,5 см (средняя частота 60 000 МГц). Зависимости величины этого поглощения от давления, частоты, температуры и влажности получены Ван-Влеком в разработанной им теории поглощения радиоволн. Частотные зависимости поглощения водяным паром и кислородом приведены на рис. 2.

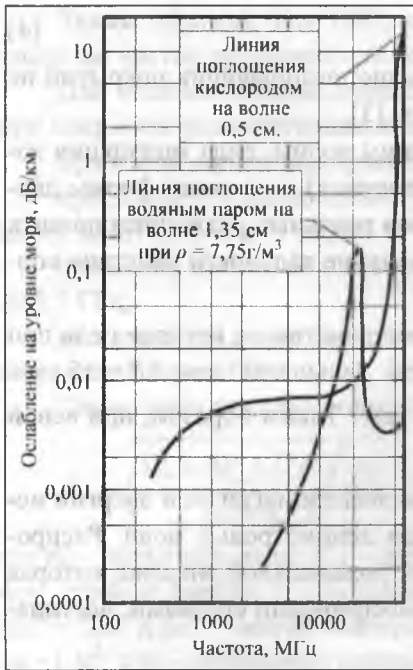


Рис. 2. Графики частотной зависимости поглощения радиоволн в атмосфере водяным паром на волне 1,35 см и кислородом на волне 0,5 см

Частотная зависимость поглощения водяным паром, приведенная на рис. 2, соответствует средней абсолютной влажности воздуха $\rho = 7,75 \text{ г/м}^3$, что характерно для района Вашингтона. Введение абсолютной влажности вместо давления водяного пара обусловлено тем, что поглощение водяным паром прямо пропорционально абсолютной влажности воздуха, поэтому изменения интенсивности сигнала за счет поглощения водяным паром можно выразить непосредственно через изменения абсолютной влажности атмосферы. Из рис. 2 видно, что поглощение водяным паром в интервале частот от 13 000 до 32 000 МГц превышает поглощение атмосферным кислородом. Это означает, что в этом интервале полное поглощение сильно зависит от содержания водяного пара в атмосфере; вне этого интервала полное поглощение более чувствительно к изменениям плотности кислорода.

Поглощение кислородом при температуре $T = 293 \text{ К}$ и нормальном атмосферном давлении, выраженное в дБ/км, определяется соотношением [4]

$$\gamma_1 = \frac{0,34}{\lambda^2} \left[\frac{\Delta \nu_1}{1/\lambda^3 + \Delta \nu_1^2} + \frac{\Delta \nu_2}{(2+1/\lambda)^2 + \Delta \nu_2^2} + \frac{\Delta \nu_2}{(2-1/\lambda)^2 + \Delta \nu_2^2} \right],$$

где λ – длина волны, для которой определяется поглощение; $\Delta \nu_1$ и $\Delta \nu_2$ – коэффициенты ширины спектральных линий, измеряемые в обратных сантиметрах

Графики зависимости удельного затухания δ , дБ/км от λ в диапазоне 3...100 мм для слабого (1 мм/ч), среднего (4 мм/ч) и сильного (16 мм/ч) дождя, а также для водяного пара ($T = 20^\circ\text{C}$), кислорода и тумана представлены в [1]. Зависимость дальности обнаружения цели с учетом удельного затухания δ , дБ/км ($R_{\text{пц}}$ определяется выражением (6.17) в [1]:

$$R_{\text{пц}} = R_{\text{ц}} e^{-0,115 \delta l}, \tag{5}$$

где l – длина участка атмосферы с удельным затуханием δ , дБ/км.

При $l = R_{\text{пц}}$ уравнение (5) становится трансцендентным:

$$R_{\text{пц}} = R_{\text{ц}} e^{-0,115 \delta R_{\text{пц}}}. \tag{6}$$

Решение его производится с помощью графиков (рис. 6.5 и 6.6 в [1]), где представлена зависимость величины $R_{\text{пц}}$ от дальности в свободном пространстве и удельного затухания в атмосфере.

Учитывая, что глубина зоны интенсивных осадков при прохождении атмосферных фронтов достигает нескольких сотен километров, велика вероятность, что вся трасса прохождения луча РЛС может оказаться в зоне повышенного затухания [5].

Для вышеприведенных параметров средней мощности и ЭПР цели на рис. 3 представлены графики зависимости $R_{\text{ц}}$ (максимальная дальность, кривая 1) и $R_{\text{пц}}$ от длины волны при затухании в кислороде (кривая 2) и в осадках: дождь с интенсивностью $I = 4 \text{ мм/ч}$ (кривая 3) и $I = 16 \text{ мм/ч}$ (кривая 6).

Из приведенных графиков следует, что:

1) в РЛС обнаружения целей средней и большой дальности в атмосферных условиях использование рабочей частоты выше 15 ГГц нецелесообразно, т.к. даже в ясную погоду максимальная дальность обнаружения снижается ~ в 3,5 раза (рис. 3, кривая 2);

2) с учетом приемлемого снижения $R_{\text{пц}}$ ~ на 10% в условиях средней интенсивности осадков для РЛС обнаружения средней и большой дальности целесообразно использовать $\lambda_p \geq 20 \text{ см}$.

Действительно, в [4] указывается, что, например, диапазон 300...1000 МГц выгодно использовать при создании надежных РЛС наблюдения за воздушным пространством с большой дальностью действия, не зависящих от погодных явлений. Однако в современных летательных аппаратах и других носителях для обеспечения скрытности во вторичных электромагнитных полях примечается так называемая технология «Стелс», предусматривающая существенное снижения ЭПР средств воздушного нападения за счет специальной конструкции планера и за счет использования радиопоглощающих материалов

(РПМ). Снижение ЭПР ($\sigma_{ц}$) за счет конструкции наблюдается в широком диапазоне частот облучения, а для некоторых форм корпуса летательного аппарата вообще не зависит от частоты. Например, ЭПР объекта в виде вытянутого сфероида определяется только соотношением полуосей $\sigma_{сф} = \pi b^4/a^2$, где b – длина малой полуоси; a – длина большой полуоси.

Исходя из этого целесообразно рассмотреть влияние РПМ на величину $\sigma_{ц}$. В соответствии с формулой (1) дальность цели $R_{цп} = \sqrt[4]{\sigma_{ц}}$. Тогда для уменьшения дальности на 20% $R_{цп}/R_{ц} = 0,8$ получаем $\sigma_{цп}/\sigma_{ц} = 0,4$, т.е. ЭПР цели необходимо уменьшить на 60% с помощью специальных поглощающих материалов (РПМ).

Поскольку в настоящее время для систем ПВО разработаны различные РЛС обнаружения, отличающиеся, например, по дальности действия, и, следовательно, по рабочей длине волны, то радиопоглощающие покрытия должны быть достаточно широкополосными.

В [6] приводятся данные по зарубежному широкополосному ферромагнитному дисперсному материалу Ferratic E, коэффициент отражения $K_{отр}$ от каждого слоя в котором резонансно зависит от отношения толщины слоя РПМ к длине волны λ_p . Однако такое покрытие имеют высокий удельный вес, что исключает его применение на летательных аппаратах и затрудняет его применение на других носителях [6].

Многослойные диэлектрические радиопоглощающие покрытия, которые благодаря своему малому удельному весу широко применяются в современной авиации, из-за резонансного механизма поглощения каждого слоя имеют относительно узкую суммарную эффективную рабочую полосу, обычно перекрывающую один радиолокационный диапазон длин волн (например X-диапазон) [6].

В [6] приведены графики зависимости коэффициента поглощения РПМ ($K_{п}$) от длины волны падающего излучения: в диапазоне 2...4 см $K_{п}$ изменяется от 7 дБ (200 МГц) до 32 дБ.

Противорадиолокационные радиопоглощающие покрытия, применяемые для снижения ЭПР целей, получили наибольшее распространение для относительно коротковолновых X ($\lambda \sim 3$ см) и S ($\lambda \sim 10$ см) диапазонов. При этом поглощение СВЧ-сигнала составляет, как правило, ~ 30 дБ [5] (ослабление сигнала в ~ 1000 раз) (см. рис. 3).

С внедрением в технику РПМ нанотехнологий и метаматериалов значительно расширился частотный диапазон эффективного радиопоглощения с одновременным его сдвигом в более низкочастотную область [7]. На основании частотных зависимостей поглощения РПМ, приведенных в [6, 7], и в соответствии с формулой (1) был произведен расчет дальности обнаружения цели с узкополосным покрытием РПМ (кривая 4 на рис. 3) и с широкополосным покрытием РПМ (кривая 5 на рис. 3) с учетом влияния дождя по всей трассе луча РЛС интенсивностью $I_d = 4$ мм/ч.

Из анализа графиков следует, что допустимое снижение дальности обнаружения цели (с РПМ) не более 10% при воздействии дождя интенсивностью до $I_d = 16$ мм/час можно обеспечить при работе на $\lambda_p \geq 30$ см. На рис. 4 показано влияние протяженности ΔR_d трассы сигнала в дожде на дальность обнаружения цели $R_{цп}$, которая существенно (в 2...3 раза) снижает дальность до цели при увеличении ΔR_d с 1 км до 100 км.

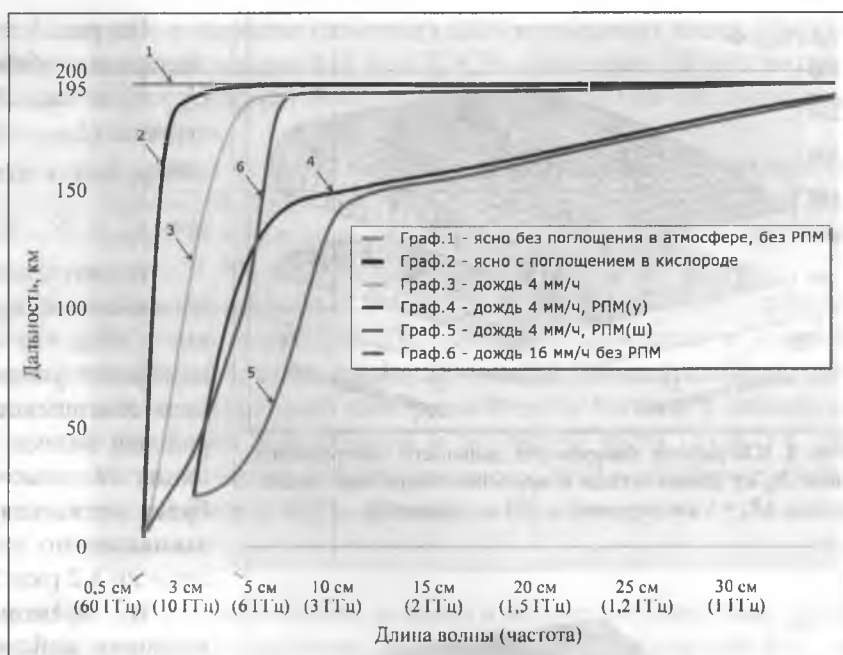


Рис. 3. Графики зависимости дальности обнаружения от длины волны (частоты) при атм. осадках и при наличии радиопоглощающих покрытий

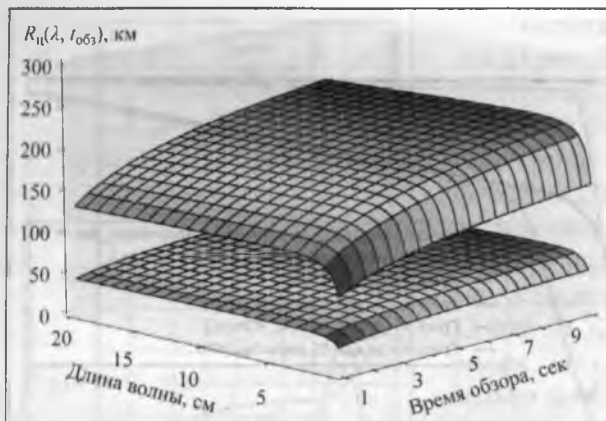


Рис. 4. 3D-графики зависимости дальности обнаружения цели R_d от длины волны и времени обзора при полосе дождя $\Delta R_d = 1$ км (верхний) и 100 км (нижний)

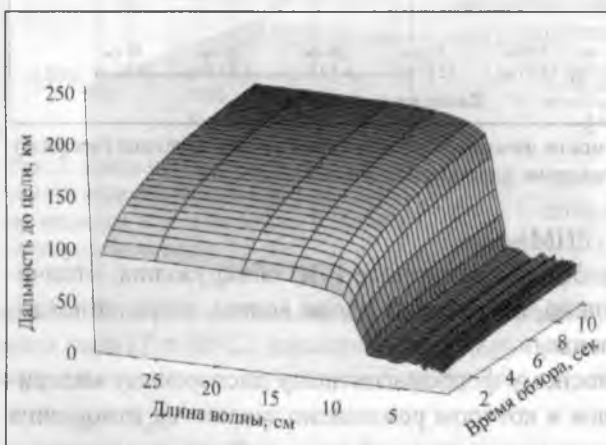


Рис. 5. 3D-график зависимости дальности обнаружения цели R_d от длины волны и времени обзора при воздействии дождя и применения РПМ

На рис. 5 показано совместное воздействие на дальность обнаружения цели ($\sigma_{ц} = 1 \text{ м}^2$) дождя ($I_d = 4 \text{ мм/час}$, $\Delta R_d = 1 \text{ км}$) и радиопоглощающего материала ($L_{РПМ} = 30 \text{ дБ}$), которые снижают дальность обнаружения цели R_d при $\lambda_p^1 = 1 \dots 7 \text{ см}$ на $\sim 70\%$, а при $\lambda_p^2 = 15 \dots 30 \text{ см}$ на $\sim 10\%$.

В соответствии с кривой 5 на рис. 3 снижение дальности обнаружения при $\lambda_p = 20 \dots 25 \text{ см}$ составит $\sim 20\%$, что обеспечит требования по точности измерения угловых координат целей. При дальнейшем совершенствовании РПМ в части расширения рабочей полосы частот эффективность РЛС, работающих не только в X-диапазоне, но и в L-диапазоне будет снижаться, хотя и 20% уменьшения дальности эквивалентно потерям излучаемой мощности практически в 2 раза, точнее – 1,94 раза ($\sim 2,9 \text{ дБ}$).

В практической радиолокации, например, наземная войсковая мобильная РЛС обнаружения средней дальности AN/TPS-59 (США) и трехкоординатная мобильная РЛС обнаружения «Мартелло» (фирма «Маркони», Англия) работают на $\lambda_p = 21 \dots 24 \text{ см}$ и $\lambda_p = 23 \text{ см}$ соответственно. Этот диапазон длин волн применяется в связи с тем, что в данном случае необходимо измерять угловые координаты целей со среднеквадратическими ошибками $\sigma_\beta = 6'$ и $\sigma_\epsilon = 16'$. Поскольку эти угловые ошибки прямопропорциональны λ_p , то их допустимая величина и определила компромиссный выбор длины волны.

В то же время существуют схемы АФАР, в которых диаграммы направленности формируется в цифровых процессорах по специальному алгоритму [8], что дает возможность получать ДНА различной формы. В [8] представлены результаты моделирования так называемого «сжатия» ДНА в 5, 8 и 100 раз.

Таким образом, применяя цифровую АФАР со специальным алгоритмом обработки эхосигналов, работающую на $\lambda_p \cong 30 \text{ см}$, можно не только обнаружить малоразмерную цель с РПМ в сильном дожде при $I_d = 16 \text{ мм/ч}$, но и достаточно точно измерить ее угловые координаты. При $\lambda_p = 30 \text{ см}$ и раскрыве антенны $9 \times 6 \text{ м}$, аналогичном РЛС AN/TPS-59, получим ширину ДНА по углу места $\Delta\theta_\epsilon^0 = \frac{60 \cdot 30 \text{ см}}{900 \text{ см}} = 2,0^\circ$. Тогда

случайная ошибка измерения угла места составит $\sigma_\epsilon^0 = \frac{\Delta\theta^0}{\sqrt{(с/ш)}} = \frac{2,0^\circ}{\sqrt{100}} = 0,2^\circ = 12'$ или 3,4 мрад, т.е. в

$$\frac{3,4 \text{ мрад}}{1,7 \text{ мрад}} = 2 \text{ раза больше, чем на } \lambda_p = 25 \text{ см}.$$

Но при использовании алгоритма «сжатия» ДНА, например, при $K_{сж} = 5$ раз получим $\Delta\theta_\epsilon^0 = 0,4^\circ = 24'$ и, соответственно, ошибку $\sigma_\epsilon = 2,4'$, т.е. при «сжатии» ДНА СКО $\sigma_\epsilon^{сж} = 0,7 \text{ мрад}$ (примерно в 2,4 раза меньше, чем на $\lambda_p = 25 \text{ см}$).

Цифровая АФАР представляет собой дискретную излучающую поверхность, состоящую из излучателей, расположенных на расстоянии $d \geq 0,5\lambda_p$ друг от друга. Каждый излучатель соединен СВЧ-линией с приемным каналом, выходной сигнал каждого из которых после АЦП поступает в цифровой процес-

сор, где по этим сигналам формируется «сжатая» и несжатая (обычная) ДНА в цифровых кодах. Так как число излучателей на раскрыве АФАР, например, площадью 1 м^2 при $\lambda_p = 30 \text{ см}$ составит 36 шт., то приемных каналов необходимо иметь тоже 36. Для раскрыва РЛС, аналогичных АН/TPS-59, площадью 54 м^2 число приемных каналов составит около 2000 шт.

Таким образом, число приемников может быть от нескольких десятков до нескольких сотен, поэтому единственным практическим вариантом реализации цифровой АФАР является радиооптическая (радиофотонная) фазированная антенная решетка (РОФАР) с волоконно-оптическими линиями передачи сигналов от раскрыва антенны в аппаратную часть [9, 10].

При этом приемный и передающий каналы представляют собой часть распределенного приемопередающего модуля (РППМ) ЦАФАР и включает в себя МШУ, усилитель мощности и оптико-электронные устройства, которые посредством ВОЛС связаны с модуляторами и фотодетекторами, расположенными на раскрыве РОФАР, состоящей из излучателей электромагнитного сигнала и элементов механического крепления. РППМ позволяет разделить электронную и фотонную части ППМ, т.е. решить две задачи: защитить РОФАР от воздействия мощного широкополосного ЭМИ и обеспечить более эффективное охлаждение выходных усилителей мощности СВЧ-сигнала.

● Из проведенного обзора следует:

1) выбор длины волны (λ_p) для РЛС средней и большой дальности должен определяться минимальным сокращением дальности действия РЛС из-за потерь энергии СВЧ-сигнала как при распространении в атмосфере, в том числе в осадках, так и при поглощении падающей энергии на цель, покрытой радиопоглощающим материалом (РПМ);

2) миллиметровый диапазон длин волн не может применяться в данном случае, т.к. потери за счет поглощения в кислороде атмосферы приводят к сокращению дальности в 65 раз;

3) сантиметровый диапазон не может применяться в РЛС средней и большой дальности, т.к. при $\lambda_p = 3...5 \text{ см}$ в дожде интенсивностью $I_d = 4 \text{ мм/ч}$ дальность сокращается на 40...10%, а в дожде $I_d = 16 \text{ мм/ч}$ – на 80...47%;

4) применение радиопоглощающих материалов (РПМ) с коэффициентом подавления $\sim 30 \text{ дБ}$ в полосе 3,5... 20 ГГц для уменьшения ЭПР целей приводят к существенному сокращению дальности на 90...30% при $\lambda_p = 3...7 \text{ см}$. РПМ с полосой подавления 4...9 ГГц при дожде $I_d = 4 \text{ мм/ч}$ приводит к снижению дальности обнаружения при $\lambda_p = 3 \text{ см}$ до 90%, при $\lambda_p = 10 \text{ см}$ до 30%, при $\lambda_p = 20 \text{ см}$ до 20%.

5) в условиях атмосферных осадков значительной интенсивности по трассе распространения луча РЛС сантиметрового диапазона дальность обнаружения обычных целей существенно снижается, а для малозаметных целей дальность обнаружения падает до неприемлемо малых значений.

6) снижение дальности действия РЛС на $\lambda_p = 30...35 \text{ см}$ даже в условиях относительно сильного дождя $I_d = 16 \text{ мм/час}$ по целям с РПМ не превышает 10%, что допустимо.

7) использование более длинноволновых диапазонов ($\lambda_p = 30...35 \text{ см}$) в традиционных РЛС нецелесообразно, т.к. угловые ошибки измерения координат целей недопустимо возрастают.

8) для обеспечения требуемой угловой точности при работе на $\lambda_p \cong 35 \text{ см}$ в настоящее время в литературе предлагается цифровая АФАР со специальным алгоритмом «сжатия» ДНА до 10 раз и более, что соответственно обеспечивает снижение среднеквадратической угловой шумовой ошибки до 10 раз и более. Однако в цифровой АФАР необходимо применение большого числа приемных каналов, равного числу излучателей АФАР, т.е. от единиц до сотен каналов. Использование волноводных, коаксиальных, полосковых, микрополосковых линий соединения излучающего раскрыва с аппаратной частью АФАР в этом случае приведет к значительному увеличению массы АФАР, ее габаритных размеров и стоимости. Исходя из этого, целесообразной реализацией ЦАФАР является радиооптическая (радиофотонная) АФАР (РОФАР), в которой применяются волоконно-оптические линии соединения и устройства переноса электромагнитного СВЧ-сигнала в оптический диапазон и обратно.

Очень важным аргументом в пользу РОФАР является устойчивость ее работы при воздействии специальных мощных широкополосных импульсов, которые полностью выводят из строя электронные схемы СВЧ. Применение цифровых РОФАР, состоящих из распределенных радио-

оптических приемо-передающих модулей, позволяет решать проблемы всепогодного обнаружения малоразмерных целей (с РПМ) на большой дальности, измерять их координаты с большой точностью при воздействии мощных широкополосных импульсов.

Литература

1. Радиолокационные устройства / Под ред. В.В. Григоровича-Рябова. М.: Сов. радио. 1970. 159 с.
2. Современная радиолокация / Под ред. Ю.Б. Кобзарова. М.: Сов. радио. 1969. 704 с.
3. Бартон Д. Радиолокационные системы. М.: Изд-во МО. 1967. 160 с.
4. Справочник по радиолокации. В 4-х томах / Под ред. М.И. Скольника. М.: Сов. радио. 1976. Т. 1: Основы радиолокации. 456 с.
5. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоздат. 1994. 716 с.
6. Львова Л.А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов. Снежинск: РФЯЦ ВНИИТФ. 2003. 213 с.
7. Пат. № 2200749 РФ. Радиопоглощающий материал и способ его изготовления. Воронин И.В., Науменко В.Ю., Петрунин В.Ф. № 2000129275/04; Заявл. 22.11.2000.
8. Кортнев В.П. Алгоритмический метод «сжатия» ДН АФАР // Антенны. 2009. № 12 (151). С. 13–17.
9. Бахрах Л.Д., Зайцев Д.Ф. Фазированные антенные решетки на основе распределенных оптических антенных модулей // Доклады АН. 2004. Т. 394. № 4. С. 465–468.
10. Зайцев Д.Ф. Нанопотоника и ее применение. М.: АКТЕОН. 2012. 445 с.

Поступила 15 июля 2015 г.

Selecting the frequency range of all-weather AESA

© Authors, 2016
© Radiotekhnika, 2016

D.F. Zaitsev – Dr. Sc. (Eng.), Main Designer,
Moscow State University of Information Technologies, Radio Engineering and Electronics (MIREA),
Head of Laboratory, JSC «CRET»
E-mail: zaysev@yandex.ru

V.P. Kortnev – Ph. D. (Eng.), Senior Research Scientist, JSC «CRET»

D.V. Mordasov – Junior Research Scientist, JSC «CRET»
E-mail: danmordasov@gmail.com

The results of the comparative analysis of the estimated range of detection of stealth targets in terms of precipitation on the track, depending on the frequency band for medium-range broadband radiophotonic active electronically scanned array (AESA)-(ROFAR). It is shown that in the precipitation of significant intensity of the propagation path of the beam radar centimeter range, the detection range of the common objectives is significantly reduced, and for the purpose of stealth detection range falls to unacceptably low values.

At the same time, the possibility of radiophotonic AESA work in a wide instantaneous bandwidth relative to the low-frequency decimeter bands, significantly, several times, to increase the range of detection of stealth targets, despite the difficult weather conditions, while maintaining a high range resolution in this way.

Application of new technologies of beam narrowing of radiophotonic AESA also gives the opportunity to save high resolution corner inherent centimeter range AESA without increasing the size of the antenna array.

This ensures high efficiency of radiophotonic AESA in all weather conditions – all-weather capability.

References

1. Radiolokaczionny'e ustrojstva / Pod red. V.V. Grigorovitcha-Ryabova. M.: Sov. radio. 1970. 159 s.
2. Sovremennaya radiolokaczija / Pod red. Yu.B. Kobzarova. M.: Sov. Radio. 1969. 704 s.
3. Barton D. Radiolokaczionny'e sistemy'. M.: Izd-vo MO. 1967. 160 s.
4. Spravochnik po radiolokaczii v 4 tomah / Pod red. M.I. Skolnika. M.: Sov. Radio. 1976. T. 1: Osnovy' radiolokaczii. 456 s.
5. Vorob'ev V.I. Sinopticheskaya meteorologiya. L.:Gidrometeoizdat. 1994. 716 s.
6. L'vova L.A. Radiolokaczionnaya zametnost' letatel'ny'x apparatov. Snezhinsk: RFYaCz VNIITF. 2003. 213 s.
7. Pat. № 2200749 RF. Radiopogloshhayushhij material i sposob ego izgotovleniya. Voronin I.V., Naumeriko V.Yu., Petrunin V.F. № 2000129275/04; Zayavl. 22.11.2000.
8. Kortnev V.P. Algoritmicheskij metod «szhatiya» DN AFAR // Antenny'. 2009. № 12 (151). 13–17 s.
9. Bahrax L.D., Zajcev D.F. Fazirovanny'e anteny'e reshetki na osnove raspredelenny'x opticheskix anteny'x modulej // Doklady' AN. 2004. T. 394. № 4. S. 465–468.
10. Zajcev D.F. Nanofotonika i ee primenenie. M.: AKTEON. 2012. 445 s.