

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В БЛИЖНЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЗОНАХ АНТЕННЫ

В. Н. БЫКОВ, С. Н. БЫКОВ, С. А. ВИННИЧЕНКО, А. М. ГРИЧАНЮК, Н. Н. КОЛЧИГИН, Г. Г. ОСИНОВЫЙ

Предложено применение известного метода декомпозиции, используемого для измерения эффективной поверхности рассеяния объектов сложной формы в ближней и промежуточной зонах антенны радиолокатора, для оценки с помощью радиометрического измерительного комплекса миллиметрового диапазона (ММД) интегральной радиояркостной температуры наземного объекта сложной формы и формирования его двухмерного радиометрического изображения. Представлены характеристики и методика измерений радиояркостной температуры объектов изучаемой сцены с помощью радиометрического измерительного комплекса 8 мм диапазона в ближней и промежуточной зонах антенны. Произведена оценка снижения радиояркостного контраста «объект – фон» за счет применения радиопоглощающего материала.

Ключевые слова: наземный объект сложной формы, радиометрический измерительный комплекс, миллиметровый диапазон, радиопоглощающий материал.

ВВЕДЕНИЕ

Известно применение метода декомпозиции для экспериментально-расчетного определения радиолокационной характеристики – эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) наземного объекта [1]. Применение радиолокационных станций для определения ЭПР объектов в дальней зоне антенны часто трудно реализуемо технически. Это вызвано необходимостью устранения мешающих переизлучений от соседствующих с объектом естественных ландшафтов (деревьев, кустов) и искусственных сооружений техногенного характера. Применение для этих целей безэховых камер ограничивает размеры исследуемых объектов.

В работе [2] приведена методика измерения характеристик радиолокационного отражения объектов декомпозиционным методом в ближней и промежуточной зонах антенны. В основу методики положен тот факт, что поле, отраженное от объекта сложной формы, имеет локальный характер. Таким образом, полное поле от объекта представляет сумму полей от локальных разрешаемых участков (без учета взаимодействия). Коэффициент отражения K_i каждого из локальных участков можно измерить с помощью малогабаритного измерителя коэффициента отражения в ближней и промежуточной зонах антенны.

Поверхность объекта сложной формы делится на разрешаемые участки, со сторонами каждого участка больше длины волны $d > \lambda$. Размеры участков разрешения выбираются равными размеру облучаемого «пятна» диаграммы направленности антенны (ДНА) по уровню половинной мощности, для заданного расстояния R . Измеритель коэффициента отражения при измерении амплитуды отраженного сигнала от составных частей объекта располагается на расстоянии R от центров разрешаемых участков таким образом, чтобы его оптическая ось проходила через центры

участков. При каждом последующем измерении измеритель коэффициента отражения перемещается (параллельно оси R) на величину d .

Так как поле, отраженное от объекта сложной формы, представляет собой сумму полей от отдельных участков разрешения, то средняя ЭПР всего объекта $\bar{\sigma}_{об}$ приближенно равна сумме средних ЭПР локальных участков ($\bar{\sigma}_i$), при этом считается, что фазы отраженных полей взаимно независимы и случайны:

$$\bar{\sigma}_{об} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{\sigma}_i, \quad (1)$$

где N – количество участков разбиения объекта.

ЭПР локальных участков объекта определяется с помощью эталона и рассчитывается по формуле:

$$\bar{\sigma}_i = \frac{P_{об}}{P_{эм}} \bar{\sigma}_{эм} = K_{i об} \bar{\sigma}_{эм}, \quad (2)$$

где $P_{об}$ и $P_{эм}$ – мощности отраженных сигналов от участка объекта и эталона, соответственно,

$K_{i об} = \frac{P_{об}}{P_{эм}}$ – значения коэффициента отражения от участка объекта по мощности. В качестве эталона рассматривается плоский металлический экран с коэффициентом отражения $K_{эм} = 1$, геометрические

размеры которого равны: $a = 2R \operatorname{tg} \theta_{0,5}^0 / 2$,

$b = 2R \operatorname{tg} \varphi_{0,5}^0 / 2$, $\theta_{0,5}^0, \varphi_{0,5}^0$ – значения ширины диаграммы направленности передающей, в данном случае рупорной, антенны по половинной мощности в двух плоскостях.

Указанный метод декомпозиции может быть применим для оценки интегральной радиояркой температуры объекта, радиояркого контраста «объект–фон», формирования радиометрических (РМ) изображений объектов по результатам экспериментальных измерений, полученных при помощи РМ датчиков миллиметрового диапазона (ММД) волн. РМ датчик ММД представляет собой апертурную (зеркальную параболическую или линзовую) антенну и радиометрический приемник миллиметрового диапазона.

В работе [3] приведены РМ изображения, полученные с помощью радиометрического измерительного комплекса ММД в дальней зоне антенны (рис.1, рис.2). В приведенной работе формирование РМ изображений осуществляется путем пространственного объединения радиоярких температур разрешаемых элементов объекта, т. е. также имеет место реализация метода декомпозиции.

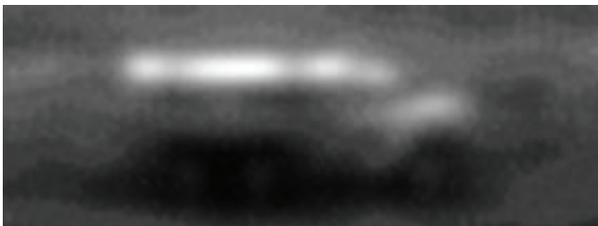


Рис.1. Фото и РМ изображение объекта в дальней зоне



Рис.2. Внешний вид РМ измерительного комплекса ММД

Отличие метода [3] от метода, приведенного в работах [1,2], состоит в том, что визирование объекта осуществляется из одной точки посредством углового перемещения диаграммы направленности антенны (ДНА) радиометрического измерительного комплекса в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а не за счет параллельного переноса антенны. При этом, как показали результаты формирования изображений ма-

лоразмерного наземного объекта на дальности порядка 20 м (рис.1), геометрические искажения изображений практически не наблюдаются.

В связи с тем, что формирование изображений в дальней зоне антенны не всегда представляется возможным, а безэховая камера, как дорогостоящее сооружение, может отсутствовать, представляется целесообразным рассмотреть возможность применения метода декомпозиции для оценки радиоярких температур и радиояркого контраста отдельных разрешаемых элементов объекта в ближней и промежуточной зонах антенны.

Целью данной статьи является развитие метода декомпозиции при формировании радиометрических изображений объектов в ближней и промежуточной зонах антенны.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Подробное описание радиометрического измерительного комплекса (РМИК) ММД (рис.2), функциональная схема которого показана на рис.3, приведено в работах [3, 4]. Технические характеристики РМ датчика ММД приведены в таблице 1.



Рис.3. Схема РМИК ММД

Таблица 1

Характеристики РМ датчика ММД

Длина волны	8,6 мм
Фокусирующая система – двухзеркальная антенна Кассегрена, диаметр	340 мм
Линейное разрешение на дальности:	
25 м	750 мм
10 м	300 мм
Тип РМ приемника	модуляционный, прямого усиления
Диапазон измеряемых температур	0 ... 500 К
Флуктуационная чувствительность	0,077 К/с
Постоянная времени измерений	1 с, 0,1 с, 0,01 с
Погрешность измерения радиояркой температуры	0,85 К
Вид выходной шкалы	линейная
Поляризация излучения	линейная, вертикальная (горизонтальная)

Опорно-поворотное устройство (ОПУ), на котором размещены антенна и высокочастотная часть радиометра, позволяет осуществлять обзор пространства в широком диапазоне углов: до $\pm 90^\circ$ от направления на объект (по азимуту) и $\pm 60^\circ$ от горизонта (по углу места).

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) обеспечивает оцифровку выходного сигнала РМ приемника в ПЭВМ, путем преобразования медленно меняющегося напряжения с аналогового выхода РМ в цифровую последовательность.

АЦП является многоканальным и допускает проведение одновременных измерений и обработки сигналов 8 каналов (датчиков). Количество уровней дискретизации входного сигнала в каждом из каналов 4096 (12 разрядов двоичного кода).

Блок управления и синхронизации задает режим работы ОПУ и обеспечивает синхронность работы поворотного устройства, АЦП и ПЭВМ в процессе получения РМ изображений.

Результаты съемки записываются на жесткий диск ПЭВМ в виде:

- текстового файла, содержащего таблицу значений (отсчетов) аналого-цифрового преобразователя;
- графического файла формата BMP;
- информационного текстового файла, описывающего условия проведения эксперимента.

Для снижения шумов АЦП применяется фильтрация результатов радиометрической съемки. При заданном размере окна фильтра вычисляется среднее значение (усреднение) или находится медианное значение (медианная фильтрация). Результат медианной фильтрации, с шириной сглаживающего окна 5, представлен в виде графика на рис.4, где кривая 1 – данные без обработки, кривая 2 – результат медианной фильтрации.

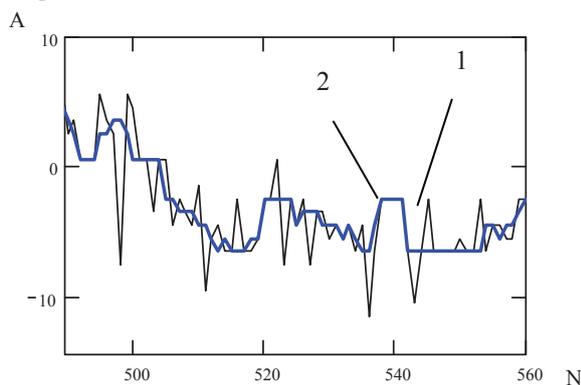


Рис.4. Результат медианной фильтрации шумов АЦП и радиометра

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Методика проведения измерений поясняется на примере измерения коэффициента излучения радиопоглощающего материала (РПМ), предназначенного для маскировки объектов из металла в ММД.

Основным режимом формирования РМ изображений в ММД является режим автоматического управления положением опорно-поворотного устройства. В этом режиме осуществляется построчное сканирование луча ДНА радиометра в заданном секторе телесного угла с последующим формированием растровых полутоновых, либо цветных изображений на экране дисплея ПЭВМ. При этом сигнал с выхода аналогового канала радиометра поступает на АЦП управляющей ЭВМ, а получаемые данные регистрируются в памяти ПЭВМ в виде относительных двоичных отсчетов (уровней сигнала) для каждой точки изображения.

Предусмотрен также режим ручного управления положением поворотного устройства. В этом случае наведение и позиционирование луча ДНА радиометра на требуемый участок объекта осуществляет оператор путем нажатия клавиш на блоке управления и контроля процесса наведения посредством оптического визира.

Последовательность проведения измерений:

1. Установка динамического диапазона радиометра в пределах от температуры неба в зените до температуры имитатора абсолютно черного тела (АЧТ).
2. Установка антенны в первоначальное положение, например, под углом $\theta = 35^\circ$ от надира.
3. Радиальное размещение в зоне обзора антенны плоского открытого металлического листа, металлического листа под РПМ, и имитатора АЧТ (см. рис. 5).
4. Проведение измерений в соответствии с нижеследующим алгоритмом.

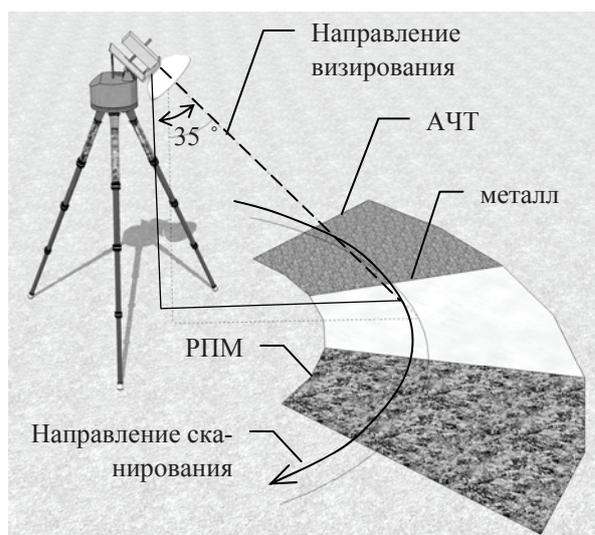


Рис. 5. Схема расположения тестовых образцов поверхностей в зоне сканирования антенны РМИК

Алгоритм измерения излучательной способности:

1. Сканирование исследуемых поверхностей с записью результатов измерения в память ПЭВМ.
2. Обработка результатов измерения на ПЭВМ:

- а) разделение цифрового массива отсчетов АЦП на три части, соответствующие металлу, металлу под РПМ и имитатору АЧТ;
- б) вычисление средних значений отсчетов АЦП для всех исследуемых материалов (см. рис.6);
- в) вычисление коэффициента излучения РПМ.

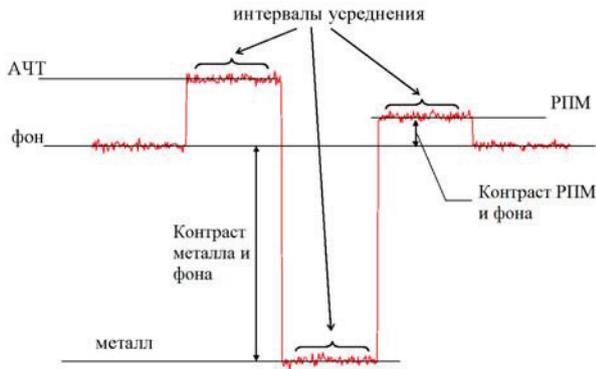


Рис. 6. Результаты оценки средних значений радиояркости и контрастов подстилающих поверхностей

Методика расчета коэффициента излучения РПМ. Методика расчета коэффициента излучения РПМ заключается в следующем:

1. Принятые допущения:

- ввиду малых расстояний от антенны до подстилающей поверхности (ближняя либо промежуточная зона антенны) затуханием в атмосфере пренебрегаем;
- полагаем, что металлический лист является зеркально отражающей поверхностью, а имитатор АЧТ и РПМ – диффузно рассеивают электромагнитные волны;
- радиояркость неба, отраженная от диффузно рассеивающей поверхности, равна температуре неба при угле наблюдения $90^\circ - \theta = 55^\circ$.

2. Исходные данные для расчета:

T_H – радиояркость неба при угле наблюдения 55° [$T_H \approx 50\text{ K}$];

T_0 – температура подстилающей поверхности (измеряется термометром);

k_M – коэффициент излучения окрашенного металла ($k_M = 0,01$);

$k_{АЧТ}$ – коэффициент излучения имитатора АЧТ ($k_{АЧТ} = 0,98$);

A_M – среднее арифметическое отсчетов АЦП, соответствующих радиояркости металла (рассчитывается по результатам измерений);

$A_{АЧТ}$ – среднее арифметическое отсчетов АЦП, соответствующих радиояркости АЧТ (рассчитывается по результатам измерений);

$A_{РПМ}$ – среднее арифметическое отсчетов АЦП, соответствующих радиояркости РПМ (рассчитывается по результатам измерений).

3. Расчет радиоярковой температуры АЧТ и металла:

$$T_{АЧТ} = T_0 \cdot k_{АЧТ} + T_H (1 - k_{АЧТ}),$$

$$T_M = T_0 \cdot k_M + T_H (1 - k_M)$$

4. Расчет радиоярковой температуры РПМ:

$$T_{РПМ} = \frac{(A_{РПМ} - A_M) \cdot (T_{АЧТ} - T_M)}{A_{АЧТ} - A_M} + T_M.$$

5. Расчет коэффициента излучения РПМ:

$$k_{РПМ} = \frac{T_H - T_{РПМ}}{T_H - T_0}.$$

3. ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ РАДИОЯРКОСТНОГО КОНТРАСТА «ОБЪЕКТ – ФОН»

Известно, что излучательная способность фона (грунт, сухая трава) лежит в пределах $k_\Phi = 0,85 - 0,95$.

Значение радиоярковой температуры фона находится по формуле:

$$T_\Phi = T_0 \cdot k_\Phi + T_H (1 - k_\Phi).$$

Оценка снижения контраста «металл под РПМ – фон земной поверхности» производится по формуле:

$$R = \frac{|T_\Phi - T_M|}{|T_\Phi - T_{РПМ}|},$$

где R – коэффициент снижения радиояркового контраста замаскированного объекта.

Оценка погрешности измерений. Относительная погрешность измерения контраста зависит от относительной погрешности измерения радиоярковых температур объекта и фона.

Оценим максимальную относительную погрешность измерения радиоярковой температуры.

Максимальные относительные погрешности измерения физических величин, по которым оценивается радиоярковая температура, таковы:

$${}^{TM}T_0 = \frac{1}{600} = 0,167\%;$$

$${}^{TM}k = \frac{1}{100} = 1\%;$$

$${}^{TM}T_H = \frac{5}{280} = 1,79\%.$$

Полагая, что погрешности данных величин распределены по нормальному закону (максимальная погрешность в 2,7 раза больше среднеквадратической погрешности) и статистически независимы, получаем, что дисперсия оценки радиоярковой температуры в соответствии с разработанной методикой составит величину:

$$\begin{aligned}\sigma_{T_M}^2 &= \left(\frac{dT}{dk}\right)^2 \cdot \sigma_k^2 + \left(\frac{dT}{dT_0}\right)^2 \cdot \sigma_{T_0}^2 + \left(\frac{dT}{dT_H}\right)^2 \cdot \sigma_{T_H}^2 = \\ &= (T_0 - T_H)^2 \cdot \sigma_k^2 + k \cdot \sigma_{T_0}^2 + \sigma_{T_H}^2.\end{aligned}$$

Подставляя в данное соотношение соответствующие значения погрешностей, получаем:

$$\begin{aligned}\sigma_{T_M}^2 &= (300 - 20)^2 \cdot 0,0037^2 + 0,98 \cdot 0,185^2 + \\ &+ 1,85 = 2,957 K.\end{aligned}$$

Инструментальная погрешность радиометра известна: $\sigma_{T_{PM}}^2 = 0,85 K$.

Таким образом, среднеквадратическая погрешность измерения радиояркой температуры составляет:

$$\sigma_T^2 = \sqrt{\sigma_{T_M}^2 + \sigma_{T_{PM}}^2} = \sqrt{2,957^2 + 0,85^2} = 3,077 K.$$

Погрешность измерения радиояркого контраста составляет: $\sigma_{\Delta T}^2 = \sqrt{3,077^2 + 3,077^2} = 4,352 K$.

При максимальном динамическом диапазоне принимаемого сигнала 280 К относительная среднеквадратическая погрешность измерения радиояркого контраста составляет 1,554 %.

ВЫВОДЫ

На основе проведенного анализа известного метода декомпозиции, используемого для оценки радиолокационных характеристик объектов в ближней и промежуточной зонах антенны измерителя, предложено использование метода декомпозиции для оценки радиоярких характеристик объектов сложной формы пассивными радиометрическими системами ММД. Показано, что метод декомпозиции и приведенная в работе методика измерения радиояркой температуры материалов при помощи радиометрического измерительного комплекса ММД позволяют производить оценку снижения радиояркого контраста объекта сложной формы на однородном фоне, за счет применения радиопоглощающего материала (покрытия).

Литература

- [1] Патент на корисну модель № 115935. Переносний пристрій для вимірювання коефіцієнта відбиття. Колчигін М.М., Биков С.М., Биков В.М., Хардіков В.В., Демченко О.А., Іванченко Д.Д., Половников Г.Г., Калугін Б.А. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.04.2017, Бюл. № 8. ⁽¹⁹⁾ UA ⁽¹¹⁾ 115935 ⁽⁵¹⁾ МПК G01R 27/06(2006.01). Заявка U 2016 13621 від 30.12.2016. Рішення про видачу Патенту України від 25.04.2017 р. – 4 с.
- [2] Патент на корисну модель № 119169. Спосіб вимірювання ефективної площі розсіяння великогабаритних об'єктів в ближній зоні. Колчигін М.М., Легенький М.М., Масловський О.А., Биков В.М., Субач Н.С., Васильченко І.І., Биков С.М., Осіновий Г.Г., Бутрим О.Ю. Зареєстровано в Державному реєстрі патен-

тів України на корисні моделі 11.09.2017, Бюл. № 17. ⁽¹⁹⁾ UA ⁽¹¹⁾ 119169 ⁽¹³⁾U МПК G01S 13\00. Заявка u 2017 03910 від 20.04.2017. Рішення про видачу патенту України від 11.09.2017 р. – 6 с.

- [3] Матричные радиометрические корреляционно-экстремальные системы навигации летательных аппаратов: Монография [Текст] / В.И. Антюфеев, В.Н. Быков, А.М. Гричанюк, Д.Д. Иванченко, Н.Н. Колчигин, В.А. Краюшкин, А.М. Сотников. – Х.: Изд-во ООО «Щедрая усадьба плюс», 2014. – 372 с.
- [4] A scanning measuring radiometry complex with computer control / V. Antyufeev, V. Bykov, A. Grichaniuk, D. Ivanchenko, V. Krayushkin / 2007 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques, **IEEE Explore**, p. 486-488, **ISBN: 978-1-4244-1584-7**.
- [5] Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника, Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. (в 4-х томах). Том 4. Радиолокационные станции и системы. – М.: «Сов. радио», 1978. – 376 с.

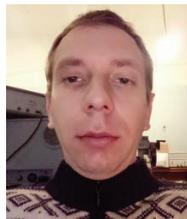
Поступила в редколлегию 18.12.2017



Быков Виктор Николаевич, докт. техн. наук, с.н.с., ведущий научный сотрудник, профессор кафедры теоретической радиофизики, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков. Научные интересы: радиотеплолокация, системы навигации летательных аппаратов, дистанционное зондирование Земли, цифровая обработка изображений.



Быков Сергей Николаевич, научный сотрудник кафедры теоретической радиофизики, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина. Научные интересы: системы навигации летательных аппаратов, дистанционное зондирование Земли.



Винниченко Сегрей Александрович, научный сотрудник кафедры теоретической радиофизики, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина. Научные интересы: метрология, СВЧ измерения, радиотеплолокация.



Гричанюк Александр Михайлович, канд. техн. наук, научный сотрудник, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба. Научные интересы: радиотеплолокация, системы навигации летательных аппаратов, дистанционное зондирование Земли, цифровая обработка изображений.



Колчигин Николай Николаевич, докт. физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой теоретической радиопизики, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина. Научные интересы: исследование характеристик рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы, взаимодействие сверхкоротких импульсов со сложными объектами, разработка и моделирование антенн для импульсных и широкополосных сигналов.



Осиновий Геннадий Геннадиевич, начальник проектного отдела, Государственное предприятие «КБ «Южное», Днепропетровск. Научные интересы: исследование характеристик рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы.

УДК 621.396.96

Розвиток методу декомпозиції при формуванні радіометричних зображень наземних об'єктів складної форми у ближній та проміжній зонах антени / В.М. Быков, С.М. Быков, С.О. Винніченко, О.М. Грічанюк, М.М. Колчигін, Г.Г. Осіновий // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2017. – Том 16, № 3, 4. – С.106–111.

Запропоновано застосування відомого методу декомпозиції, який застосовується для вимірювання ефективної поверхні розсіяння об'єктів складної форми у ближній та проміжній зонах антени радіолокатора, для оцінки за допомогою радіометричного вимірювального комплексу міліметрового діапазону (ММД) інтегральної температури радіояскравості наземного об'єкта складної форми і формування його двовимірного радіометричного зображення.

Наведено характеристики і методика вимірювання температури радіояскравості об'єктів сцени, що вивчається, за допомогою радіометричного вимірювального комплексу 8 мм діапазону у ближній та проміжній зонах антени. Наведено оцінку зниження контрасту радіояскравості «об'єкт-фон» за рахунок застосування радіопоглинаючого матеріалу.

Ключові слова: наземний об'єкт складної форми, радіометричний вимірювальний комплекс, міліметровий діапазон, радіопоглинаючий матеріал.

Табл.:01, Іл.:06, 05 найм.

UDC 621.396.96

Development of the decomposition method in the formation of radiometric images of terrestrial objects of irregular shape in the near and intermediate zones of an antenna / V.N. Bykov, S.N. Bykov, S.A. Vinnichenko, A.M. Grichaniuk, N.N. Kolchigin, G.G. Osinovy // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2017. – Vol. 16, № 3, 4. – P.106–111.

The application of the well-known decomposition method used to measure the effective surface of scattering of objects of irregular shape in the near and intermediate zones of a radar antenna is proposed for estimating the integral radar-brightness temperature of a terrestrial irregular shape object and formation of its 2-D radiometric image with the help of a radiometric measuring complex of the millimeter range (MMD). The characteristics and methods for measuring the radio brightness temperature of the objects of the studied scene are described using a radiometric measuring complex of 8 mm range in the near and intermediate zones of the antenna. An estimation of the reduction of the radio-contrast counterpoint "object-background" is made by using a radio absorbing material.

Keywords: terrestrial irregular shape object, radiometric measuring complex, millimeter range, radio absorbing material.

Tab.: 01, Fig.: 06, Ref.: 05 items.