

М. А. Степанов¹

¹ Новосибирский государственный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ПОВЕРХНОСТНО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ ФРАГМЕНТА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрена задача синтеза малоточечной модели рельефа подстилающей поверхности. Модель может быть использована для проведения полунатурного имитационного моделирования при работе радиолокационной станции в режиме маловысотного полета. Предложен способ задания рельефа в виде кусочно-ломаной аппроксимации. Приведен алгоритм, позволяющий в реальном времени по заданному рельефу рассчитать для каждого из элементов разрешения по дальности его угловое положение и угловые размеры. Эти параметры определяют, соответственно, математическое ожидание и ширину плотности распределения вероятности угловых шумов. Возможность работы в реальном времени обеспечивается использованием при задании рельефа прямых в сферической системе координат. Приведены рекомендации по выбору геометрической модели из семейства ранее обоснованных. Синтезированные модели обеспечивают заданную форму корреляционных функций угловых шумов и адекватно замещают отражения от распределенных объектов. Геометрические модели могут быть использованы как основа матричных имитаторов отраженных электромагнитных волн.

Ключевые слова: маловысотный полет, имитация, матричный имитатор

Введение

В настоящее время на различных этапах разработки радиолокационных станций (РЛС) широко используется полунатурное имитационное моделирование [1–3], когда в лабораторных условиях при помощи имитаторов создается сигнально-помеховая обстановка, характерная для работы РЛС в реальных условиях [4]. Достоверность получаемых при этом результатов во многом определяется точностью используемых в имитаторах моделей замещающих радиолокационных объектов [5, 6].

При моделировании электромагнитных волн, отраженных от замещаемых объектов, широко используют геометрические модели [7]. Разработан аппарат синтеза таких моделей по известным параметрам угловых шумов (флуктуаций фазового фронта отраженной волны) замещаемых объектов [8–10]. К ним относят параметры плотности распределения вероятностей угловых шумов (математическое ожидание и параметр, характеризующий ширину распределения), а также корреляционную функцию угловых шумов. Однако остается открытым вопрос определения этих параметров для типовых радиолокационных объектов. Один из важных замещаемых объектов – поверхность Земли. Эхосигналы от земной поверхности являются информационными для

ряда режимов, в частности режима маловысотного полета (МВП) [3, 11].

Цель настоящей работы – предложить алгоритм формирования малоточечной геометрической модели на примере режима МВП с облетом препятствия.

Моделирование подстилающей поверхности для режима МВП

Рассмотрим моделирование подстилающей поверхности для бортовой РЛС, обеспечивающей режим МВП. В данном режиме на основе сведений о рельефе подстилающей поверхности, сформированных РЛС, вырабатываются указания по безопасному маневрированию самолета. Выделяют следующие режимы МВП [2, 3]:

- облет препятствий с маневрированием в вертикальной плоскости;
- обход препятствий с маневрированием в горизонтальной плоскости;
- облет и обход препятствий с маневрированием в двух плоскостях.

В первых двух режимах осуществляется сканирование диаграммой направленности антенны (ДНА) лишь в одной плоскости (угломестной для

облета и азимутальной для обхода) [2]. При реализации облета и обхода для построения сечений рельефа поверхности требуется сканирование ДНА в двух плоскостях [2]. Ограничимся режимом облета препятствия.

В режиме МВП отдельно для каждой из плоскостей применяют метод амплитудной моноимпульсной пеленгации. В пределах ширины главного лепестка (ГЛ) ДНА этот метод обеспечивает однозначную взаимосвязь реальной части комплексного отношения сигналов разностного $U_{\Delta}(\gamma)$ и суммарного $U_{\Sigma}(\gamma)$ каналов с отклонением линии визирования от равносигнального направления γ [2, 3, 11]:

$$F(\gamma) = \operatorname{Re} \left(\frac{U_{\Delta}(\gamma)}{U_{\Sigma}(\gamma)} \right).$$

$F(\gamma)$ часто называют пеленгационным соотношением. Зная его, можно вычислить ошибку пеленгации и определить точное направление прихода электромагнитной волны, отраженной от объекта. Зависимость направления прихода от дальности используется для формирования радиолокационной базы данных о рельефе местности. Схематично формирование такой зависимости, исходя из положения носителя и облучаемой поверхности для случая облета препятствия, показана на рисунке. Для случая обхода препятствия пеленгационное соотношение формируется аналогичным образом, за исключением того, что оценка производится в азимутальной плоскости.

Из рисунка видно, что каждый из элементов разрешения имеет свое угловое положение и угловые размеры, являющиеся информационными признаками для РЛС. С точки зрения угловых шумов, это приведет к изменению математического ожидания и параметра μ плотности распределения вероятности (ПРВ).

При синтезе модели, замещающей рельеф подстилающей поверхности для режима МВП, можно выделить следующие основные этапы:

- задание рельефа местности;
- определение зависимости $\theta(D)$ для текущих координат носителя и направления визирования ДНА;
- определение параметров сигналов, подводимых к излучателям матричного имитатора, для каждого элемента разрешения по дальности с учетом выбранной конфигурации излучателей и модели.

Рассмотрим эти этапы подробнее.

Задание рельефа местности

Используем земную горизонтированную систему координат, широко распространенную в авиации [12]. Ось X системы координат направлена на север, Y – вверх, Z – дополняет систему до правой. Для задания профиля рельефа можно использовать кусочно-линейную аппроксимацию. В этом случае задаются координаты узловых точек ломаной линии, аппроксимирующей рельеф (x_i, y_i, z_i) , где i – порядковый номер узловой точки. По координате z

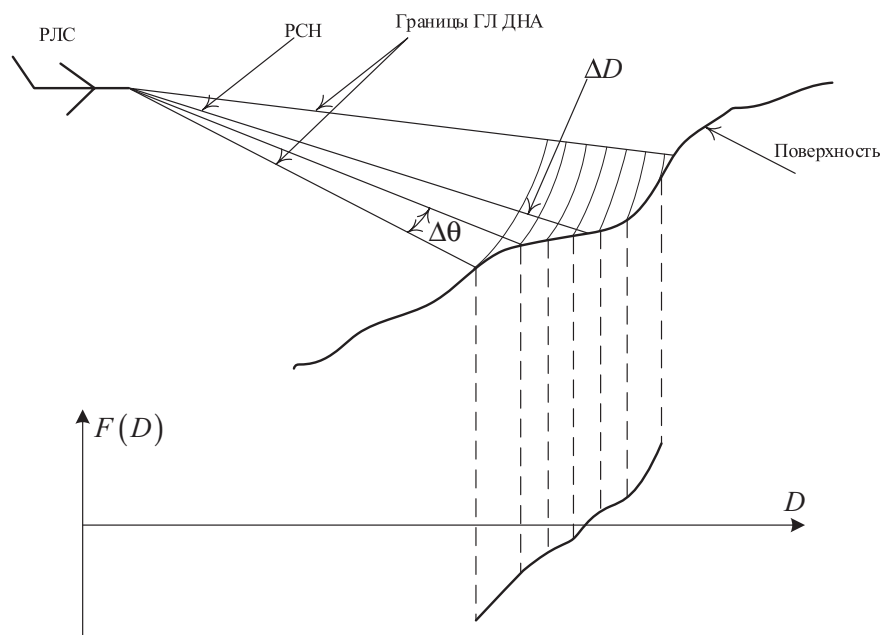


Рисунок. Формирование пеленгационного соотношения при облете препятствия: РСН – равносигнальное направление; ΔD – размер элемента разрешения по дальности; $\Delta \theta$ – угловой размер площадки поверхности, формирующей отражения в элементе разрешения по дальности

рельеф представляет собой плоскость. В этой же системе координат задается местоположение носителя (x_H, y_H, z_H) и вектор его направления движения (v_x, v_y, v_z). На этом этап задания параметров заканчивается.

Определение угловых координат и размеров элементов рельефа

Дальнейшие действия должны выполняться в реальном времени, т.е. с учетом циклограммы работы реального локатора. Сведения о текущем режиме работы РЛС (направления визирования ДНА по азимуту α_A и углу места θ_A , разрешение по дальности ΔD) поступают в имитатор по каналу связи.

Для текущего направления визирования ДНА определим сечение рельефа. Перейдем в связанную систему координат (ССК) с началом отсчета, совмещенным с фазовым центром антенны РЛС:

$$X_i = \frac{x_i - x_n}{\cos(\alpha_A)}; Y_i = y_i - y_n; Z_i = z_i - z_n.$$

Определим полярные координаты всех узловых точек рельефа в ССК. Угол θ ССК отсчитывается от горизонта, направление положительных углов – вверх:

$$D_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2}; \theta_i = \arctg\left(\frac{X_i}{Y_i}\right).$$

Координата α_i узловых точек рельефа в дальнейших вычислениях не используется и для сокращения объема вычислений не рассчитывается.

Запишем уравнения всех прямых, на которых лежат отрезки, аппроксимирующие рельеф, в полярной ССК. Для этого необходимо определить полярное расстояние и полярный угол прямых [13]:

$$P_i = \frac{|C_i|}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}}, \phi_i = \mp \arccos\left(\frac{A_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}}\right),$$

где верхний знак выбирается при $C > 0$; $A_i = Y_{i+1} - Y_i$; $B_i = X_i - X_{i+1}$; $C_i = X_i Y_{i+1} - X_{i+1} Y_i$.

Так как моделирование ведется только для фрагмента поверхности, попавшего в ГЛ ДНА, определяем номер отрезка N , аппроксимирующего рельеф, в пределы которого попадает нижняя граница ГЛ:

$$\theta_N \leq \theta_A - \frac{\Delta\theta}{2} < \theta_{N+1},$$

где $\Delta\theta$ – ширина ДНА в угломестной плоскости.

Для нижней границы ГЛ ДНА можно определить дальность до рельефа как точку пересечения прямой:

$$D_0 = \frac{P_N}{\cos\left(\theta_A - \frac{\Delta\theta}{2} - \phi_N\right)}.$$

Полученное значение является минимальной (начальной) дальностью, с которой приходят отражения к РЛС. Увеличивая дальность, начиная с этого значения, можно получить зависимость угла визирования элемента разрешения от дальности:

$$\theta(D) = \arccos\left(\frac{P_N}{D}\right) + \phi_N.$$

Очевидно, что при переходе величины $\theta(D)$ через узловую точку рельефа Θ необходимо инкрементировать индекс используемого отрезка рельефа N . Расчет $\theta(D)$ имеет смысл проводить лишь в пределах заданной аппроксимации рельефа и следа ГЛ ДНА на этой аппроксимации.

Таким образом, для каждого из элементов разрешения по дальности в пределах ГЛ ДНА определяется его угловое положение по углу места. Азимутальные координаты всех элементов разрешения равны направлению визирования ДНА.

Синтез геометрических моделей фрагментов рельефа

Для синтеза геометрической модели рассчитанные угловые координаты элементов разрешения необходимо нормировать к размерам излучающей части матричного имитатора. Эта величина будет являться математическим ожиданием ПРВ угловых шумов для рассматриваемого элемента разрешения:

$$m_n = \frac{\theta(D_0 + n\Delta D)}{\theta_M},$$

где n – номер элемента разрешения по дальности; θ_M – угловой размер излучающей части матричного имитатора.

Угловой размер каждого из элементов разрешения по дальности:

$$\Delta m_n = m_{n+1} - m_n.$$

Несложно получить соотношения, позволяющие определить параметр μ ПРВ угловых шумов при известных угловых размерах площадки [7]:

$$\mu_n = \frac{\theta_M K_P}{\Delta m_n},$$

где $K_P = \frac{P}{\sqrt{1-P^2}}$ – коэффициент, учитывающий вероятность, с которой кажущийся центр излучения попадает в рассматриваемую площадку; P – вероятность попадания.

Синтез модели, т.е. определение параметров излучаемых сигналов, проводится для каждого элемента разрешения по дальности. Моделирование угловых шумов возможно как с применением некогерентных моделей, так и частично когерентных. В первом случае целесообразно использовать

девятиточечную геометрическую модель, позволяющую отдельно управлять параметрами ПРВ угловых шумов как по двум взаимно ортогональным направлениям, так и в пределах каждого из направлений [8]. Моделирование угловых шумов для двух взаимно ортогональных направлений (азимут и угол места) позволит осуществлять моделирование для режима МВП, в котором реализован облет и обход препятствия. При синтезе такой модели необходимо пользоваться приведенными в [8] соотношениями для каждого из взаимно ортогональных направлений визирования. В качестве частично когерентной целесообразно использовать четырехточечную модель [9]. Тогда синтез частично когерентной модели проводится по приведенным в [9] соотношениям для определения коэффициентов взаимной корреляции излучаемых сигналов по каждому из направлений и мощностей излучаемых сигналов.

Остается открытым вопрос задания спектрально-корреляционных свойств угловых шумов. Выражения, определяющие авто- и взаимные корреляционные функции сигналов, излучаемых моделью, получены в [10]. С учетом малых размеров элементов разрешения (10–20 метров по дальности

и 1–2 градуса по азимуту [3, 11, 14]), применяемых в режимах МВП, подстилающая поверхность может обладать свойством делимости пространственной и временной переменных в функциях, определяющих распределение по объекту плотности авто- и взаимной корреляции отраженного сигнала. Это необходимо учитывать при выборе соотношений в [10] для расчета авто- и взаимных корреляционных функций квадратурных составляющих излучаемых сигналов модели.

Выводы

Таким образом, предложен алгоритм синтеза малоточечной геометрической модели, замещающей рельеф подстилающей поверхности. Синтезированная модель может быть использована при проведении полунатурного моделирования работы РЛС в режиме МВП. Предложен способ задания поверхности рельефа, а также записаны аналитические соотношения, позволяющие в реальном масштабе времени определять по нему параметры флуктуаций фазового фронта отраженной электромагнитной волны. Эти параметры используются при синтезе модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов В. Ю., Метельников А. Ю., Токарев Е. Г. Метод и технология полунатурного моделирования бортовых радиосистем ближнего действия фазодоплеровского типа // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2016. № 1. С. 32–41.
2. Антипов В. Н., Колтышев Е. Е., Кондратенков Г. С. Многофункциональные радиолокационные комплексы истребителей. М.: Радиотехника, 2014. 296 с.
3. Канащенков А. И., Меркулов В. И. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1. РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов. М.: Радиотехника, 2006. 656 с.
4. Тверской Г. Н., Терентьев И. П., Харченко Г. К. Имитаторы эхосигналов судовых радиолокационных станций. Л.: Судостроение, 1973. 224 с.
5. Каталог авиационных изделий и систем. Т. 1. Самолеты. Вертолеты. Тренажеры. М.: Атмосфера, 2006. 344 с.
6. Романов А. Н. Тренажеры для подготовки операторов РЛС с помощью ЭВМ. М.: Воениздат, 1980. 126 с.
7. Островитянов Р. В., Басалов Ф. А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1982. 232 р.
8. Степанов М. А., Артюшенко В. В. Геометрическая модель, составленная из девяти точек, излучающих статистически не связанные случайные сигналы. Матер. междунар. науч. – техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2018)», 2018. Т. 4. С. 179–182.
9. Подкопаев А. О., Степанов М. А., Тырыкин С. В. Четырехточечная модель двумерного распределенного объекта на основе излучателей коррелированных сигналов // Радиопромышленность. 2018. Т. 28. № 4. С. 28–34.
10. Артюшенко В. В., Киселев А. В., Степанов М. А. Моделирование корреляционных характеристик шумов координат распределенных объектов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2015. № 4. С. 19–27.
11. Справочник по радиолокации / под ред. М. И. Скольника. Пер. с англ. под общей ред. В. С. Вербы. Книга 2. М.: Техносфера, 2015. 680 с.
12. Сосновский А. А. и др. Авиационная радионавигация: справочник. М.: Транспорт, 1990. 264 с.
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. 4-е изд. М.: Наука, 1978. 832 с.
14. Канащенков А. И., Меркулов В. И., Самарин О. Ф. Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения. М.: ИПРЖР, 2002. 176 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Степанов Максим Андреевич, к. т. н., доцент, кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, д. 20, тел.: 8 (383) 346-15-46, e-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru.

M. A. Stepanov

SIMULATION OF REFLECTIONS FROM SURFACE-DISTRIBUTED OBJECTS ON EXAMPLE OF FRAGMENT OF UNDERLYING SURFACE

The paper considers the problem of the synthesis of a low-point model of the relief of the underlying surface. The model can be used to conduct semi-null simulation when the radar is operating in low-altitude flight mode. A method for defining a relief in the form of a piecewise broken approximation is proposed. An algorithm is presented that allows real-time, for a given relief, to calculate for each of the elements of the resolution in range its angular position and angular dimensions. These parameters determine the expectation of the angular noise and the width of their probability density, respectively. The ability to work in real time is provided using a straight line in a spherical coordinate system when defining the relief. The recommendations on the choice of a geometric model from the previously justified family are given. The synthesized models provide a given form of the correlation functions of angular noise and adequately replace reflections from distributed objects. Geometric models can be used as the basis for matrix simulators of reflected electromagnetic waves.

Keywords: low-altitude flight, imitation, matrix simulator

REFERENCES

1. Antipov V. Yu., Metelnikov A. Yu., Tokarev Ye. G. Semi-physical simulation method and technology for on-board phase-Doppler short-range radio systems. *Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antey*, 2016, no. 1, pp. 32–41. (In Russian).
2. Antipov V. N., Koltyshev Ye. Ye., Kondratenkov G. S. *Mnogofunktsionalnye radiolokatsionnye komplekсы istrebitelei* [Multifunctional radar systems for fighters]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014, 296 p. (In Russian).
3. Kanashchenkov A. I., Merkulov V. I. Radiolokatsionnye sistemy mnogofunktsionalnykh samoletov. Vol. 1. *RLS – informatsionnaya osnova boevykh deistvii mnogofunktsionalnykh samoletov. Sistemy i algoritmy pervichnoi obrabotki radiolokatsionnykh signalov* [Radar as an information basis for the multifunctional aircraft combat. Systems and algorithms for primary processing of radar signals]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006, 656 p. (In Russian).
4. Tverskoy G. N., Terentyev I. P., Kharchenko G. K. *Imitatory ekhsignalov sudovykh radiolokatsionnykh stantsii* [Ship radar echo simulators]. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1973, 224 p. (In Russian).
5. Katalog aviatsionnykh izdelii i sistem. Vol. 1. *Samolety. Vertolety. Trenazhery* [Aircraft. Helicopters. Simulators]. Moscow, Aerosfera Publ., 2006, 344 p. (In Russian).
6. Romanov A. N. *Trenazhery dlya podgotovki operatorov RLS s pomoshchyu EVM* [Simulators for training radar operators with the help of computers]. Moscow, Voenizdat Publ., 1980, 126 p. (In Russian).
7. Ostrovityanov R. V., Basalov F. A. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii protyazhennykh tseley* [The statistical theory of radar extended targets]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982, 232 p. (In Russian).
8. Stepanov M. A., Artyushenko V. V. A geometric model made up of nine points, radiating statistically unrelated random signals. (Conference proceedings) Aktualnye problemy elektronnoy priborostroeniya (APEP-2018), 2018. Vol. 4, pp. 179–182. (In Russian).
9. Podkopaev A. O., Stepanov M. A., Tyrykin S. V. The two-dimensional distributed object four-point model based on correlated signals emitters. *Radiopromyshlennost*, 2018, vol. 28, no. 4, pp. 28–34. (In Russian).
10. Artjushenko V. V., Kiselev A. V., Stepanov M. A. Modeling of correlation characteristics of distributed object angle noises. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii*, 2015, no. 4, pp. 19–27. (In Russian).
11. Skolnik M. I., editor. *Radar handbook*. 3rd ed. McGraw-Hill, 2008, 1328 p.
12. Sosnovskiy A. A., et al. *Aviatsionnaya radionavigatsiya: spravochnik* [Aeronautical radionavigation: a reference book]. Moscow, Transport Publ., 1990, 264 p. (In Russian).
13. Korn G., Korn T. *Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review*. McGraw-Hill, 1968, 1130 p.
14. Kanashchenkov A. I., Merkulov V. I., Samarin O. F. *Oblik perspektivnykh bortovykh radiolokatsionnykh sistem. Vozmozhnosti i ogranicheniya* [The appearance of promising airborne radar systems. Features and limitations]. Moscow, IPRZhR Publ., 2002, 176 p. (In Russian).

AUTHOR

Stepanov Maksim, Ph. D., associate professor, Department of Radio receivers and radio transmitters, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (383) 346-15-46, e-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru.