

Для цитирования: Особенности построения бортового вертолетного радиолокатора ледовой разведки на основе кругового обзора земной поверхности с синтезированием апертуры вращающейся антенны / И. Г. Анцев, А. П. Алешкин, В. В. Владимиров, Е. О. Кудрина, О. Л. Полончик, Н. А. Алешкин // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 2. С. 31–37. DOI 10.21778/2218-5453-2019-2-31-37 УДК 629.7.066.1

**И. Г. Анцев¹, А. П. Алешкин², В. В. Владимиров², Е. О. Кудрина²,
О. Л. Полончик², Н. А. Алешкин³**

¹ АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», ² Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, ³ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БОРОВОГО ВЕРТОЛЕТНОГО РАДИОЛОКАТОРА ЛЕДОВОЙ РАЗВЕДКИ НА ОСНОВЕ КРУГОВОГО ОБЗОРА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ АНТЕННЫ

Представлены результаты моделирования процессов приема и обработки сигналов дистанционного зондирования поверхности Земли с использованием в качестве носителя радиолокатора вертолета и синтезированием апертуры антенны за счет ее размещения на вращающихся лопастях несущего винта. Подтверждена математическая корректность применения разработанных алгоритмов для обработки сигналов зондирования, а также однозначность результатов измерений. При этом размеры синтезированной апертуры за счет вращения излучателя, размещенного на конце лопасти винта, эквивалентны круговой антенной решетке диаметром в десятки метров. Функциональные возможности системы дистанционного зондирования на базе данного радиолокатора соответствуют требованиям к системам наблюдения ледовой обстановки и обеспечения навигации морских судов у побережья. Результаты моделирования подтверждают перспективность дальнейших исследований в рассматриваемом направлении и могут быть использованы при разработке радиолокационных систем с синтезированием апертуры антенны, установленной на вращающихся лопастях несущего винта.

Ключевые слова: зондирование подстилающей поверхности, диаграмма направленности антенны, обработка сигнала

Введение

Основой мониторинга окружающей среды являются методы дистанционного зондирования поверхности Земли. Такие методы имеют особое значение при получении данных о параметрах ледяного покрова замерзающих акваторий, позволяют собрать детальную информацию о его пространственной структуре, что обеспечивает эффективность и безопасность хозяйственной деятельности в этих районах.

Ключевую роль в национальных ледово-информационных системах для мониторинга ледяного покрова отдаленных замерзающих акваторий, где использование традиционных методов измерения толщины льда затруднено, а в ряде случаев и невозможно, играют спутниковые средства наблюдения.

Наиболее информативной частью используемого для радиолокации диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) является миллиметровый диапазон, в котором можно обеспечить лучшее пространственное разрешение и радиометрический контраст. Однако в этом диапазоне отмечается и наибольшее затухание радиосигнала в атмосфере. Излучение с длиной волны 1,5 см сильно поглощается водяным паром, а на длине волны 5 мм существует полоса поглощения кислорода [1].

Глубина проникновения микроволн зависит от соотношения между длиной волны падающего сигнала и неровностями облучаемой поверхности, а также от значения комплексной диэлектрической постоянной материала исследуемого объекта. С увеличением частоты степень проникновения

сигнала радиолокатора в подстилающую поверхность уменьшается. Например, сигналы с частотой 450–900 МГц могут проникать в грунт на глубину до 1–3 м, а сигналы с частотой 80–300 МГц – на глубину 9–25 м [2]. В качестве грубой оценки проникающей способности обычно принимается, что она составляет половину длины волны.

Для спутникового дистанционного зондирования используются радиолокаторы Ku-, X-, C-, S- и L-диапазонов [2]. В настоящее время ведутся исследования по разработке радиолокаторов, работающих в верхней части дециметрового P-диапазона и в УКВ-диапазоне с длиной волны 1,5 м. Однако радиолокаторы этих диапазонов имеют большие габариты, их вывод и эксплуатация на орбите достаточно сложны с технической точки зрения. Кроме того, из-за особенностей распространения радиоволн через атмосферу Земли в этих диапазонах теряется когерентность сигнала, происходит существенное снижение потенциального пространственного разрешения, наблюдаются геометрические и поляризационные искажения. В силу этих причин спутниковых радиолокационных систем P- и УКВ-диапазонов пока не существует.

Таким образом, характеристики спутниковых средств зондирования, используемых для определения толщины ледяного покрова, со временем перестают отвечать возрастающим требованиям со стороны потребителей информации, а их модернизация, связанная с переходом в более высокочастотные области радиоволнового диапазона, труднореализуема.

В настоящее время ледовая авиаразведка проводится в России с вертолетов с базированием на ледоколах, нефтедобывающих платформах и удаленных посадочных площадках.

Геометрическое разрешение радиолокационных систем с реальной апертурой может быть улучшено

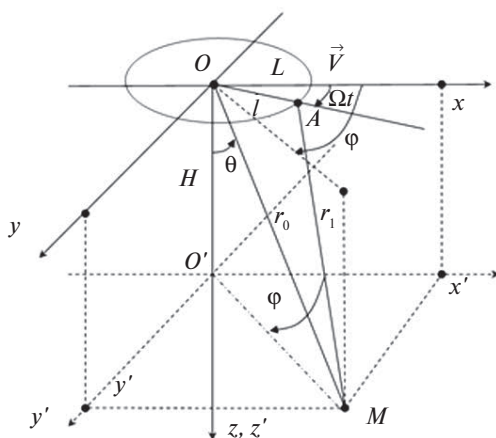


Рисунок 1. Модель движения летательного аппарата

путем применения более коротких радиоволн или путем увеличения габаритов передающей антенны. Однако оба пути повышения геометрического разрешения порождают новые проблемы. Переход в более высокочастотный диапазон работы радиолокационной системы вызывает снижение излучаемой в импульсе энергии. Значительное (более 5 м) увеличение длины антенны технически ограничено размерами и грузоподъемностью вертолета.

Радиолокационные системы с синтезированной апертурой при приближении зоны обзора к линии пути резко теряют разрешающую способность по азимуту. Устранить данный недостаток позволило использование РЛС с длинной, размещенной вдоль крыльев, антенной решеткой. Однако размеры современных вертолетов и требования к уменьшению массогабаритных характеристик РЛС не позволяют использовать антенные решетки, состоящие из большого числа элементов, что затрудняет получение высокой разрешающей способности по азимутальной координате.

Таким образом, применение радиолокационных систем зондирования подстилающей поверхности, использующих в качестве носителя вертолет, является перспективным направлением развития, однако требует проведения дополнительных исследований.

Результаты моделирования

Рассмотрим один из возможных путей решения поставленной выше технической задачи.

Модель движения летательного аппарата (ЛА) [3] представлена на рис. 1.

Выражения для расстояний r_0 и r_1 имеют, соответственно, следующий вид [3]:

$$r_0 = H \sqrt{(\operatorname{tg} \theta_0 \cos \varphi_0 - \frac{V}{H} t)^2 + (\operatorname{tg} \theta_0 \sin \varphi_0)^2 + 1}, \quad (1)$$

$$r_1 = H \sqrt{(\operatorname{tg} \theta_0 \cos \varphi_0 - \frac{V}{H} t - \frac{1}{H} \cos \Omega t)^2 + (\operatorname{tg} \theta_0 \sin \varphi_0 - \frac{1}{H} \sin \Omega t)^2 + 1}, \quad (2)$$

где H – высота полета ЛА; t – текущее время; l – длина лопасти винта; Ω – угловая скорость вращения лопасти вертолета.

Структурная схема бортового радиолокатора представлена на рис. 2 [3].

Сигнал, принятый вращающейся антенной 1, излучающей гармонические колебания, может быть представлен выражением

$$S_1(t) = S_1 \cos[2\pi f_c t - k r_1(t)] = S_1 \cos[2\pi f_c t - 2\pi f_c \frac{r_1(t)}{c}], \quad (3)$$

где $S_1 = 1$ В – амплитуда сигнала, приходящего на антенну 1; f_c – частота принимаемого сигнала в точке А;

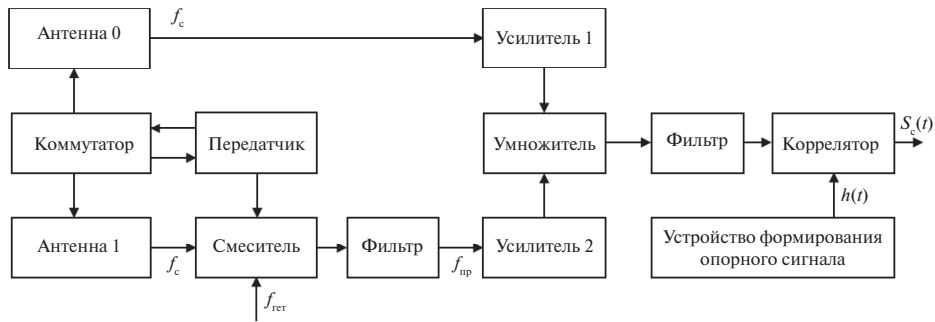


Рисунок 2. Структурная схема бортового радиолокатора для измерения толщины льда: $f_{гет}$ – частота гетеродина; $h(t)$ – опорный сигнал; $f_{пр}$ – промежуточная частота; $S_c(t)$ – сигнал на выходе коррелятора

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны; c – скорость света; r_1 – расстояние от точки A до точки M .

Сигнал, принятый центральной антенной 0 в режиме гармонических колебаний, может быть представлен выражением

$$S_0(t) = S_0 \cos[2\pi f_c(t - \frac{r_0(t)}{c})], \quad (4)$$

где $S_0 = 1$ В – амплитуда сигнала, приходящего на антенну 0 в точке O ; r_0 – расстояние от точки O до точки M .

Значение корреляционного интеграла в зависимости от времени задержки τ имеет вид [3]:

$$S(t) = \int_0^T S_{c_n}(t) dt, \quad (5)$$

где T – период вращения антенны 1 вокруг точки O .

В фильтре нижних частот подавляются высокочастотные составляющие, а сигнал перед коррелятором будет определяться выражением

$$S_{c_{n1}}(t) = S_{c_{np}}(t_0) = \frac{1}{4} S_0^3 [\cos[2\pi f_{пр} t_0 + k r_0(t) - k r_1(t)]]. \quad (6)$$

Опорный сигнал $h(t)$ в этом случае будет соответствовать выражению (6) при условии, что некоторые параметры являются известными, а другие выступают в качестве переменных величин. При $t_1 = t - \tau$ выражение для опорного сигнала будет иметь вид

$$h(t_1) = S_c(t - \tau) = \frac{1}{4} S_0^3 \cos\left(2\pi f_{пр} t + 2\pi \frac{r_0(t) - r_1(t)}{\lambda}\right), \quad (7)$$

$$S_{c_n}(t) = S_{c_{n1}}(t) h(t_1). \quad (8)$$

Параметры сигнала, входящие в выражение (6), имеют индекс «с», параметры фильтра, входящие в выражения (7), – индекс «ф».

Компьютерное моделирование процессов приема и обработки сигналов выполнено при следующих исходных данных: высота вертолета $H_c = 4000$ м; скорость вертолета $V_c = 40,0$ м/с; угловая скорость лопасти винта $\Omega = 5$ об/с; угол $\varphi_c = 45^\circ$;

угол настройки фильтра $\varphi_\phi = 0$ рад; угол $\theta_\phi = 40^\circ$; длина волны $\lambda = 0,7$ м; длина лопасти вертолета $l = 19$ м.

Временные диаграммы сигналов на выходе системы обработки (рис. 2), полученные в результате компьютерного моделирования с использованием алгоритмического языка программирования Matlab, представлены на рис. 3–14.

Исследуем зависимость уровня сигналов от углового положения цели φ_c , θ_c , высоты полета H_c , скорости движения V_c при фиксированной скорости вращения лопасти винта Ω и заданных параметрах опорного сигнала φ_ϕ , θ_ϕ , H_ϕ , V_ϕ (параметрах согласованного фильтра). Пусть параметр φ_c (азимут цели) изменяется в интервале от 0° до 80° с шагом 20° ($V_\phi = V_c = 40,0$ м/с, $h_\phi = h_c = 4000$ м, $\varphi_\phi = 0^\circ$, $\theta_\phi = \theta_c = 40^\circ$).

Полученное значение сигнала на выходе системы обработки показывает (рис. 3), что пик корреляционной функции находится на значении 0 с, что соответствует азимуту $\varphi = 0^\circ$. На рис. 4 пик корреляционной функции сместился на значение 0,01107 с, что соответствует азимуту $\varphi = 20^\circ$. Пик свертки сигнала через интервал, равный половине периода вращения, подавлен, угол наклона $\theta = 20^\circ$.

Зависимости на рис. 3–6 подтверждают корректность функционирования разработанных алгоритмов и однозначность определения координат цели.

Определим ширину пика сигнала с выхода системы обработки на уровне 0,707.

Ширина пика корреляционного интеграла на уровне 0,707 составляет 0,00097 с. Ширина диаграммы направленности бортовой синтезированной круговой апертуры составляет 0,03047 рад, или $1,7^\circ$.

Разрешающая способность в тангенциальном направлении (перпендикулярно лучу) составляет

$$\Delta X = \Theta R, \quad (9)$$

где Θ – ширина ДН, выражается в рад; R – текущая дальность.

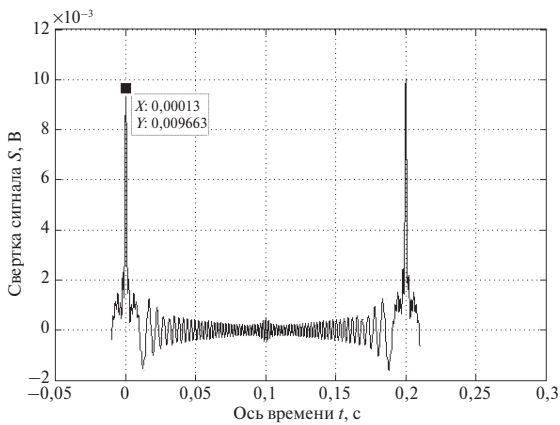


Рисунок 3. Зависимость сигнала на выходе системы обработки от времени задержки для $\varphi_c = 0^\circ$

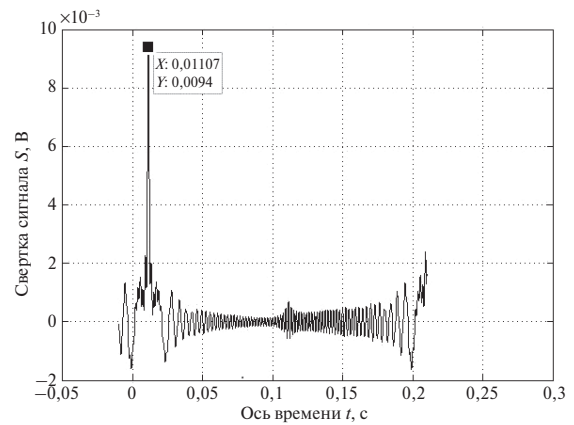


Рисунок 4. Зависимость сигнала на выходе системы обработки от времени задержки для $\varphi_c = 20^\circ$

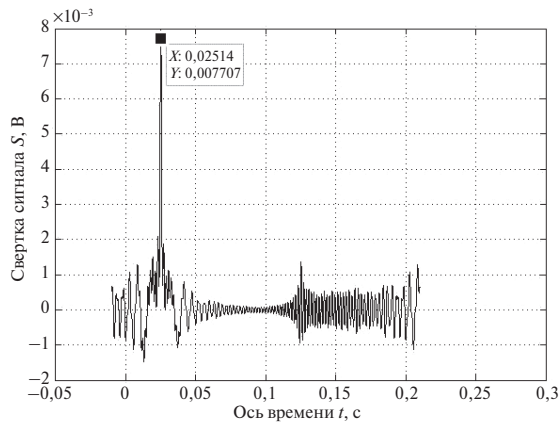


Рисунок 5. Зависимость сигнала на выходе системы обработки от времени задержки для $\varphi_c = 45^\circ$

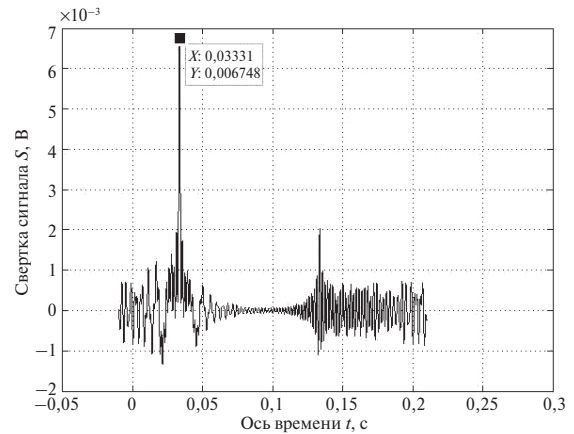


Рисунок 6. Зависимость сигнала на выходе системы обработки от времени задержки для $\varphi_c = 60^\circ$

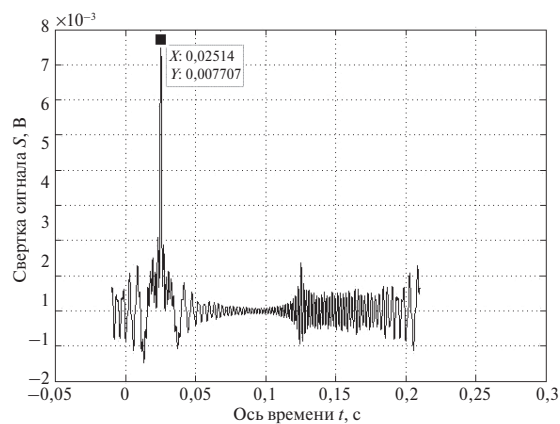


Рисунок 7. Измерение значения пика сигнала на выходе системы обработки ($\varphi_c = 45^\circ$)

Ширина ДН определяется размером антенны d [4]:

$$\Theta = k \frac{\lambda}{d}, \quad (10)$$

где d – продольный размер бортовой антенны; k – коэффициент, зависящий от типа антенной решетки.

Рассчитаем размер апертуры синтезированной антенны в соответствии с соотношением (10). Учитывая коэффициент $k = 1,178$ для круглой антенной решетки, он составил $d = 27,06$ м.

Определим максимальную дальность от вертолета до источника радиоизлучения (рис. 10) в зависимости от высоты полета.

Принимая $OB = R_3$, где R_3 – радиус Земли; $AO = h + R_3$, где h – высота носителя над земной поверхностью, получим выражение для определения максимальной дальности от вертолета до источника радиоизлучения:

$$R_{\max} = AB_{\max} = \sqrt{h^2 + 2hR_3}. \quad (11)$$

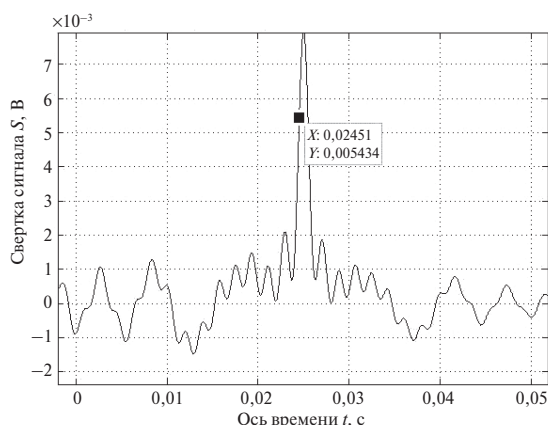


Рисунок 8. Значение сигнала на выходе системы обработки на уровне 0,707 слева ($\varphi_c = 45^\circ$)

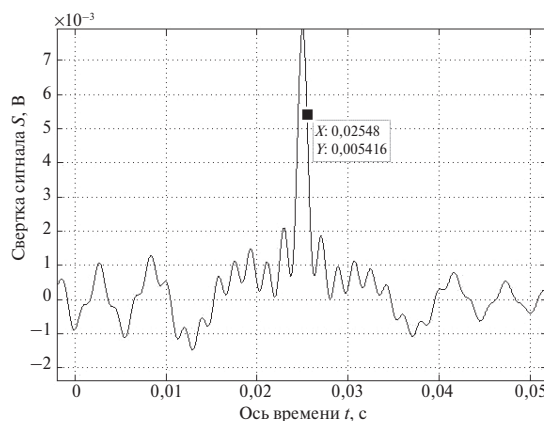


Рисунок 9. Значение сигнала на выходе системы обработки на уровне 0,707 справа ($\varphi_c = 45^\circ$)

По данным моделирования (с учетом семиградусной зоны закрытия горизонта [5]) (рис. 11 и 12), обнаружение цели происходит на расстоянии 224,2 км при высоте полета вертолета 4 км.

Определим разрешение по дальности в плоскости азимута и разрешение в плоскости азимута за один оборот винта согласно формуле (9). Результаты моделирования представлены на рис. 13 и 14.

В соответствии с [2] системы дистанционного зондирования водных поверхностей с разрешаемым на местности расстоянием в азимутальной плоскости 10–150 м используются для наблюдения льдов и навигации у побережья.

Анализ результатов, представленных на рис. 13, показывает, что разрешающая способность в плоскости азимута на расстоянии 5 км меньше 150 м, таким образом функциональные возможности системы дистанционного зондирования на базе данного радиолокатора будут соответствовать требованиям по наблюдению льдов и навигации у побережья.

Вопросы влияния траекторных нестабильностей, изменения скорости и ориентации вращения лопасти винта на разрешающую способность будут рассматриваться в дальнейших исследованиях.

Выводы

На основании результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

- подтверждена математическая корректность применения разработанных алгоритмов для приема и обработки сигналов дистанционного зондирования поверхности Земли с использованием вертолета в качестве носителя радиолокатора, а также однозначность результатов измерений;
- анализ сигналов на выходе коррелятора за один период вращения лопасти винта, в зависимости

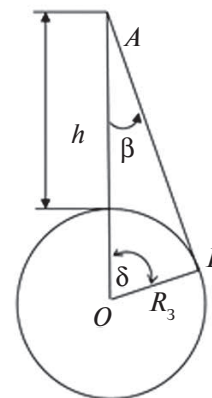


Рисунок 10. К определению максимальной дальности обнаружения объекта

от значений азимута φ_c , показывает соответствие изменения временной задержки пика корреляционного интеграла направлению на цель в азимутальной плоскости. Второй отсчет, следующий через временной интервал кратный π , подавлен;

- ширина диаграммы направленности бортовой синтезированной круговой апертуры составляет 0,03047 рад, или $1,7^\circ$, и позволяет на расстоянии 5 км обеспечить разрешающую способность системы в плоскости азимута менее 150 м;
- размеры синтезированной апертуры круговой антенной решетки за счет вращения антенны, расположенной на конце лопасти винта, эквивалентны круговой антенной решетке диаметром 27 м;
- функциональные возможности системы дистанционного зондирования на базе данного радиолокатора соответствуют требованиям к системам наблюдения ледовой обстановки и обеспечения навигации морских судов у побережья.

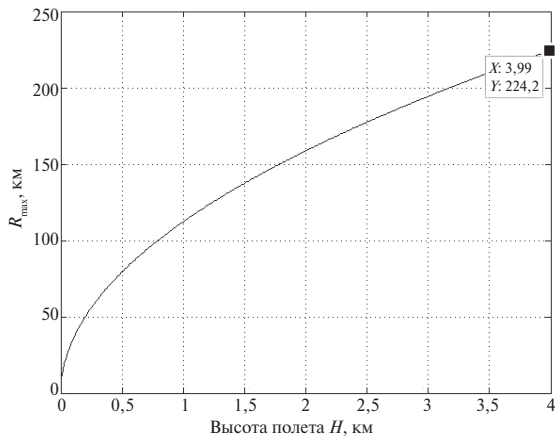


Рисунок 11. Зависимость дальности обнаружения цели от высоты подвеса антенны радиолокатора

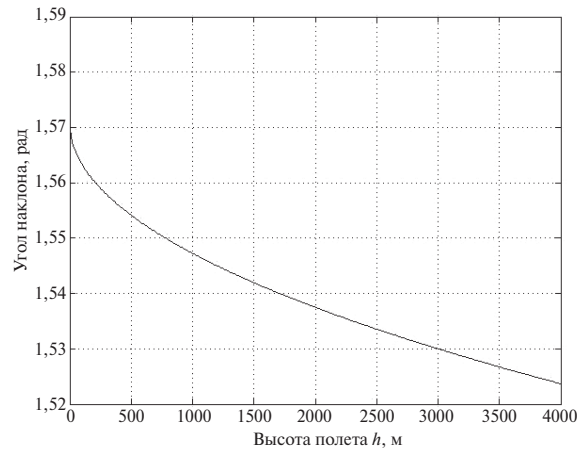


Рисунок 12. Зависимость максимального угла наклона θ от высоты подвеса антенны радиолокатора

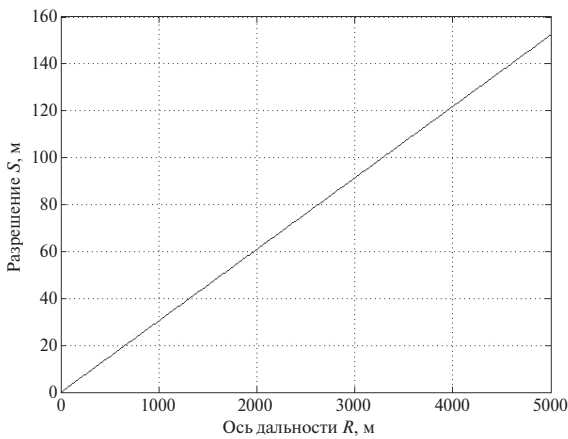


Рисунок 13. Разрешение по дальности в плоскости азимута ($\varphi_c = 45^\circ$, $l = 27,06$ м)

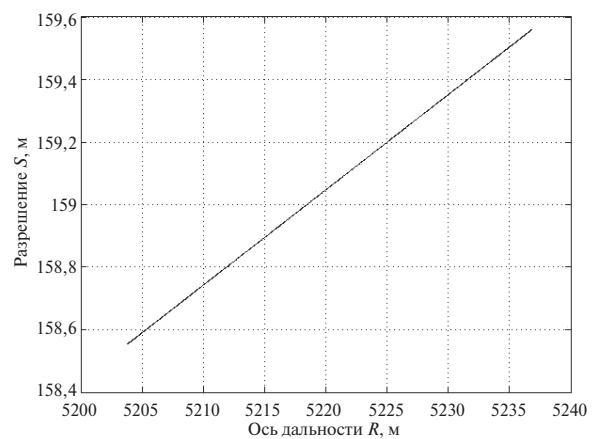


Рисунок 14. Разрешение по дальности в плоскости азимута за один оборот винта ($\varphi_c = 45^\circ$, $l = 19,5$ м)

Результаты моделирования подтверждают перспективность дальнейших исследований в рассматриваемом направлении и могут быть использованы

при разработке радиолокационных систем с синтезированием апертуры антенны, установленной на вращающихся лопастях несущего винта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии. М.: Мир, 1988. 343 с.
2. Спутниковые методы определения характеристик ледового покрова морей. Практич. пособие / под ред. В.Г. Смирнова. СПб: АНИИ, 2011. 238 с.
3. Метод обработки гармонических сигналов в бортовой радиотехнической станции с синтезированием апертуры путем вращения антенны, установленной на лопасти винта / А.П. Алешкин, О.Л. Полончик, В.И. Невзоров, В.В. Владимиров // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 50–56.
4. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.
5. Кондратенко Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анцев Иван Георгиевич, к.т.н., исполнительный директор, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д.37, лит. А, тел.: (812) 600-04-40, e-mail: radar@radar-mms.com.

Алешкин Андрей Петрович, д.т.н., проф., профессор кафедры, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Российская Федерация, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, тел.: 8 (812) 341-95-37, e-mail: a_aleshkin@mail.ru.
Владимиров Владислав Владимирович, научный сотрудник – бортовой оператор лаборатории, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Российская Федерация, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, тел.: 8 (911) 116-49-09, e-mail: vladimirov27.12.1987@mail.ru.
Кудрина Евгения Олеговна, курсант, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Российская Федерация, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, тел.: 8 (999) 206-76-15, e-mail: epolonchike@gmail.com.
Полончик Олег Леонидович, к.т.н., доцент, доцент кафедры, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Российская Федерация, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, тел.: 8 (964) 377-59-74, e-mail: o.polonchik@yandex.ru.
Алешкин Никита Андреевич, к.т.н., старший преподаватель, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: 8 (921) 892-58-57, e-mail: ales_nikita@mail.ru.

For citation: Antcev I. G., Aleshkin A. P., Vladimirov V. V., Kudrina E. O., Polonchik O. L., Aleshkin N. A. Features of construction of on-board helicopter radar ice exploration on basis of circular ground surface with synthesis of aperture rotating antenna. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 2, pp. 31–37. DOI 10.21778/2218-5453-2019-2-31-37

I. G. Antcev, A. P. Aleshkin, V. V. Vladimirov, E. O. Kudrina, O. L. Polonchik, N. A. Aleshkin

FEATURES OF CONSTRUCTION OF ON-BOARD HELICOPTER RADAR ICE EXPLORATION ON BASIS OF CIRCULAR GROUND SURFACE WITH SYNTHESIS OF APERTURE ROTATING ANTENNA

The results of modeling the processes of receiving and processing the signals of remote sensing of the Earth's surface using helicopter radar and synthesizing the antenna aperture due to its placement on the rotating rotor blades are presented. The mathematical correctness of the application of the developed algorithms for processing probing signals, as well as the uniqueness of the measurements, was confirmed. At the same time, the dimensions of the synthesized aperture due to the rotation of the radiator placed at the end of the propeller blade are equivalent to a circular antenna array with a diameter of tens of meters. The functionality of the remote sensing system based on this radar meets the requirements for ice observation and navigation systems for seagoing ships off the coast. The simulation results confirm the promise of further research in this direction and can be used in the development of radar systems with synthesized antenna aperture mounted on rotating rotor blades.

Keywords: underlying surface sounding, antenna pattern, signal processing

REFERENCES

1. Kraberg P. *Fernerkundung der Erde. Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie*. Stuttgart, Enke, 1985, 394 p. (In German).
2. Smirnov V. G., editor. *Sputnikovye metody opredeleniya kharakteristik ledovogo pokrova morei. Praktich. posobie* [Satellite methods for determining the characteristics of sea ice cover. Practical manual]. St. Petersburg, AANII Publ., 2011, 238 p. (In Russian).
3. Aleshkin A. P., Polonchik O. L., Nevzorov V. I., Vladimirov V. V. The method of processing harmonic signals in an on-board radio engineering station along with aperture synthesizing by rotating an antenna mounted on a helicopter screw blade. *Radio industry*, 2018, no. 1, pp. 50–56. (In Russian).
4. Antipov V. N., Goryainov V. T., Kulin A. N. et al. *Radiolokatsionnye stantsii s tsifrovym sintezirovaniem apertury anteny* [Radar stations with digital synthesizing antenna apertures]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1988, 304 p. (In Russian).
5. Kondratenko G. S., Frolov A. Yu. *Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Radio vision. Earth remote sensing radar systems]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2005, 368 p. (In Russian).

AUTHORS

Antcev Ivan, Ph. D., executive director, «NPP «Radar mms» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, tel.: +7 (812) 600-04-40, e-mail: radar@radar-mms.com.

Aleshkin Andrey, D. Sc., professor, professor of the chair, Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya St, Saint-Petersburg, 197198, Russian Federation, tel.: +7 (812) 341-95-37, e-mail: a_aleshkin@mail.ru.

Vladimirov Vladislav, researcher – onboard laboratory operator, Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya St, Saint-Petersburg, 197198, Russian Federation, tel.: +7 (911) 116-49-09, e-mail: vladimirov27.12.1987@mail.ru.

Kudrina Evgeniya, cadet, Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya St, Saint-Petersburg, 197198, Russian Federation, tel.: +7 (999) 206-76-15, e-mail: epolonchike@gmail.com.

Polonchik Oleg, Ph. D., associate professor, lecture of the chair, Mozhaisky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya St, Saint-Petersburg, 197198, Russian Federation, tel.: +7 (964) 377-59-74, e-mail: o.polonchik@yandex.ru.

Aleshkin Nikita, Ph. D., senior tutor of department, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (921) 892-58-57, e-mail: ales_nikita@mail.ru.