

УДК 537.86:535.016

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАДИОФОТОНИКИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ РАДИОГОЛОГРАММ

© 2025 г. Д. Буркитбаев^{1, *}, В. В. Кулагин², Р. В. Рыжук³, В. В. Валуев³, В. А. Черепенин⁴

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга, Москва, Россия

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова Российской академии наук», Москва, Россия

*e-mail: daurendo@mail.ru

Поступила в редакцию 06.09.2024 г.

После доработки 16.09.2024 г.

Принята в печать 30.09.2024 г.

Предложена схема реализации радиофотонного приемного устройства СВЧ сигналов для формирования и регистрации радиоголограмм. Численно и экспериментально исследована работа такого приемного устройства. Предложен метод обработки данных для определения координат объекта в случае сферичности отраженной волны при недостаточном удалении приемника от объекта.

Ключевые слова: микроволновая фотоника, радиофотонный приемный канал, оптическое гетеродинирование

DOI: 10.31857/S0367676525010147, EDN: DAMALI

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все более востребованной становится технология радиовидения в радиофотонных радарах, для осуществления которой необходимо создавать радиопортрет «блестящих точек» удаленного объекта в СВЧ диапазоне [1–4]. Такие радары могут быть использованы применительно к ситуациям, когда окружающее пространство требует точного контроля — в аэропортах, морских портах, в густонаселенных городах, на крупных автодорогах и др. Для реализации этой технологии необходимо создание приемных устройств с высокой разрешающей способностью. При этом использование приемных устройств СВЧ, построенных на исключительно радиоэлектронной компонентной базе, не всегда может подходить для решения такой задачи из-за ограничений по рабочей полосе частот. В то же время более высокая разрешающая способность по дальности может быть достигнута с помощью использования широкополосных и сверхширокополосных импульсов в качестве локационных сигналов [5–7]. Высокое разрешение

по углу поступления сигнала на приемную антенну может быть получено с помощью голографического метода, где для формирования радиоголограммы к отраженной волне добавляется опорная СВЧ волна и регистрируется результат интерференции двух волн, т.е. записывается электронная радиоголограмма, которая затем может быть оцифрована и подвергнута спектральному анализу для извлечения информации о местоположении удаленного объекта [8, 9]. Приемные устройства, спроектированные на основе радиофотонных технологий, позволяют реализовать алгоритм формирования и регистрации радиоголограмм [10–12].

СХЕМА ПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА

Схема приемного устройства для формирования и регистрации радиоголограммы представлена на рис. 1. Она разработана для решения одномерной задачи определения угла прихода отраженного сигнала на приемную антенну от удаленного объекта. Решение этой задачи требует формирования и регистрации радиоголограммы отраженной

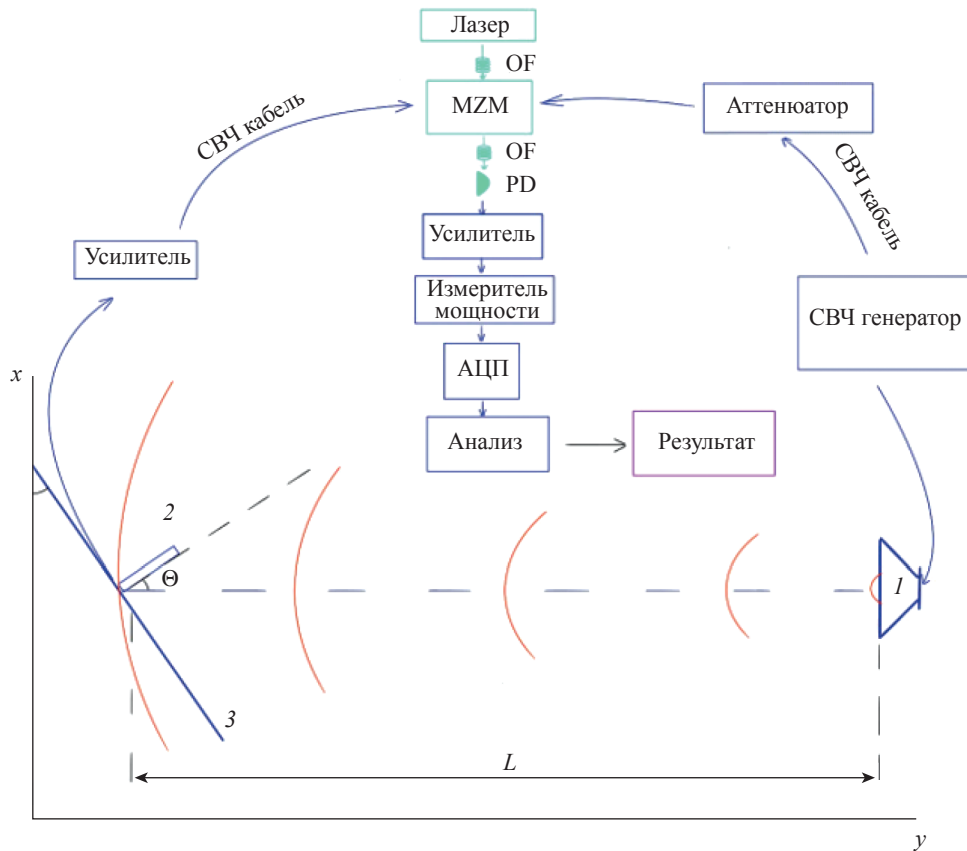


Рис. 1. Схема приемного устройства: 1 — излучающая антенна, 2 — приемная антенна, 3 — линия передвижения приемной антенны, θ — угол, L — расстояние между излучающей и приемной антеннами, OF — оптоволокну, MZM — двойной параллельный электрооптический модулятор Маха–Цандера, PD — фотодетектор, Анализ — анализ с помощью пакета программ, Результат — выходные данные.

от объекта волны СВЧ. Для этого опорная волна в радиофотонном блоке обработки, состоящем из волоконного лазера, двойного параллельного электрооптического модулятора и фотодетектора, смешивалась с входным сигналом каждого приемника линейной антенной решетки. В результате этого формировалась интерференционная картина взаимодействия отраженной и опорной волн, т. е. происходил учет фазовой информации фронта отраженной волны. Затем полученная интерференционная картина подвергалась спектральному анализу, в ходе которого определялся угол поступления отраженной волны на приемную антенну.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СХЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С помощью численных моделирований в среде MatLab была исследована работа такой системы. Волна, отраженная от объекта, рассматривалась как излучение с синусоидальной зависимостью от времени с плоским фронтом (дальняя зона). В таком случае разность фаз между сигналами СВЧ, регистрируемыми соседними приемниками, является постоянной. После смешивания отраженного и опорного сигналов в двойном парал-

лельном модуляторе Маха–Цандера и последующего их фотодетектирования формируется сигнал, содержащий сведения об интенсивности интерференционной картины отраженной и опорной волн I_{p-r} в точке нахождения отдельного приемника. При этом все оптические частотные компоненты оказываются отфильтрованными. При условии постоянства разности фаз сигналов между соседними приемниками I_{p-r} является синусоидальной функцией, аргументом которой является номер приемника в решетке или его координаты вдоль решетки. То есть на решетке формируется пространственная волна с частотой, зависящей от угла падения отраженной волны на решетку (угол падения отсчитывается от вертикали к середине линейной антенной решетки). Поэтому угол падения можно определять, вычисляя преобразование Фурье и находя частотный максимум интерференционной картины I_{p-r} .

При проведении численных моделирований использовались следующие параметры схемы: длина волны СВЧ 3 см, длина решетки 1.5 м, количество приемников 100, расстояние между соседними приемниками линейной антенной решетки 1.5 см. Фаза опорной волны соответствовала случаю нормального падения (угол θ градусов от вер-

тикали к линейной антенной решетке) при смешивании отраженного и опорного сигналов в модуляторе Маха—Цандера. На рис. 2а продемонстрирована I_{p-r} в результате усреднения по времени для случая одиночного отражающего объекта (шум предполагался малым), на рис. 2б показан ее спектр. В рассматриваемом случае отраженная волна падала на антенную решетку под углом 50 градусов от нормали. Различие формы I_{p-r} от синусоидальной функции связано с относительно малой частотой расположения приемников на длине пространственной волны. Однако расстояние между приемниками на периоде пространственной волны выбрано с учетом того, чтобы при скользшем падении отраженной волны на периоде находилось не менее двух точек оцифровки для сохранения информации. В случае низкого уровня шума угол падения волны определяется с достаточной точностью и составляет 50 градусов. В случае увеличенных шумов точность определения угла будет детерминирована полушириной спектрального пика, т.е. линейным размером антенной решетки. Если рассматривать полуширину спектрального пика по уровню половинной мощности, то она оказывается порядка одного градуса, что соответствует дифракционной ширине луча.

На рис. 2в изображена I_{p-r} в случае двух отражающих объектов, расположенных под углами 25 и 50 градусов от нормали. На рис. 2г отображен ее спектр. Направления на два объекта хорошо определяются, несмотря на более сложный вид I_{p-r} , связанный с биением двух близких частот отраженных сигналов. На рис. 2д продемонстрирован спектр I_{p-r} для случая двух близкорасположенных по углу объектов (объекты расположены под углами 20 и 21 градус от нормали). Объекты могут быть разрешены, что подтверждает сделанную выше оценку.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ

В качестве источника отраженной волны в схеме экспериментального макета приемника для определения угла падения сигнала (рис. 1) используется рупорная антенна. Излучение СВЧ генератора, настроенного на частоту 7.5 ГГц, разделяется на 2 канала. Первый канал ведет к рупорной антенне, излучающей сигнал, второй — через аттенюатор (ослабление 20 дБ) к одному из плеч двойного параллельного модулятора Маха—Цандера, предварительно настроенного на квадратурную рабочую точку (середина линейного участка передаточной функции). Приемная антенна в виде отрезка прямоугольного волновода, перемещаемая вдоль линии 3, регистрирует падающие волны со сферическим фронтом, излучаемые рупорной антенной. Сигнал с приемной антенны поступает на малошумящий СВЧ усилитель (26 дБ). Затем усилен-

ная волна поступает на второе плечо двойного параллельного электрооптического модулятора. Оптические поля, промодулированные СВЧ сигналами, поступившими на оба плеча модулятора, суммируются и поступают на фотодетектор по оптическому волокну. СВЧ поле, полученное в результате фотодетектирования, поступает на измеритель мощности через усилитель (23 дБ). Данные о замеренной мощности оцифровываются и затем анализируются с помощью пакета программ в среде MatLab.

В схеме использованы следующие компоненты:

- Agilent N1912A — измеритель мощности СВЧ;
- IXblue MXIQ-LN-30 — двойной параллельный модулятор Маха—Цандера с полосой 30 ГГц;
- Pure Photonics PPCL550 — малошумящий непрерывный одномодовый лазер с длиной волны излучения 1.5 мкм;
- НПФ Дилаз ДФДШМ40 — широкополосный InGaAs PIN фотодетектор;
- Agilent аттенюаторы 3 и 10 дБ;
- Малошумящий усилитель с полосой частот 1–18 ГГц.

Экспериментальные данные, полученные на макете, результаты их обработки, а также сравнение их с теоретической моделью представлены на рис. 3. Интерференционная картина, полученная в ходе эксперимента для угла прихода сигнала 30.8° , показана на рис. 3а (красная кривая 1). Ее форма аналогична кривой на рис. 2а, полученной в результате численного моделирования схемы. На рис. 3а также помещена кривая, демонстрирующая результат интерференции в случае поля сферической волны (синяя кривая 2), когда отраженный объект находится на недостаточном удалении от приемной антенны. Разность фаз двух кривых являлась свободным параметром и была выбрана из условия максимально близкого соответствия кривых. Можно заключить, что теория дает достаточно хорошее совпадение с экспериментом.

На рис. 3б продемонстрированы угловые спектры, полученные в результате Фурье-анализа интерференционных картин. Оценка угла, проведенная по середине экспериментального распределения (по уровню -3 дБ), составляет 30.8° . Это значение совпадает с истинным углом в эксперименте и является близким к углу 30.2° , полученному по середине теоретического спектра. Точность вычисления угла определяется шириной распределения, полученного в результате Фурье-анализа. В рассматриваемом случае ширина спектра значительная и составляет около 20° . Это обусловлено тем, что расстояние до источника сигнала является недостаточно большим, поэтому падающая волна является не плоской, а сферической. В результате величина периода пространственной волны изменяется нелинейно вдоль линии перемещения

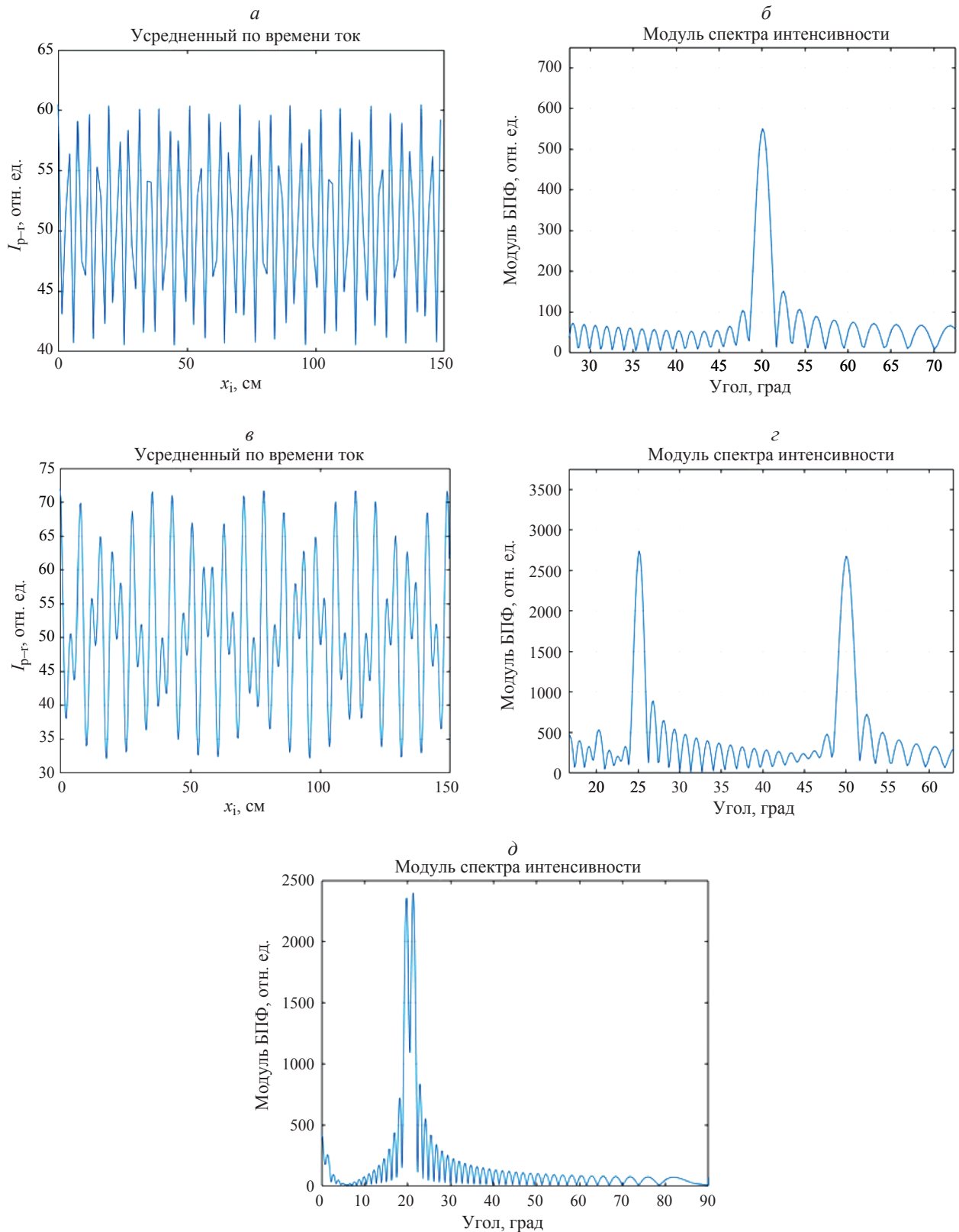


Рис. 2. Сигнал на выходе фотодетектора для одиночного отражающего объекта, расположенного под углом 50 градусов от нормали: усредненная по времени интенсивность интерференционной картины I_{p-r} (а); спектральный вид I_{p-r} (б). Сигнал на выходе фотодетектора в случае двух отражающих объектов: усредненная по времени I_{p-r} для объектов, расположенных под углами 25 и 50 градусов от нормали (в) и ее спектральный вид (г); спектральный вид I_{p-r} (д) в случае двух близкорасположенных целей под углами 20 и 21 градус.

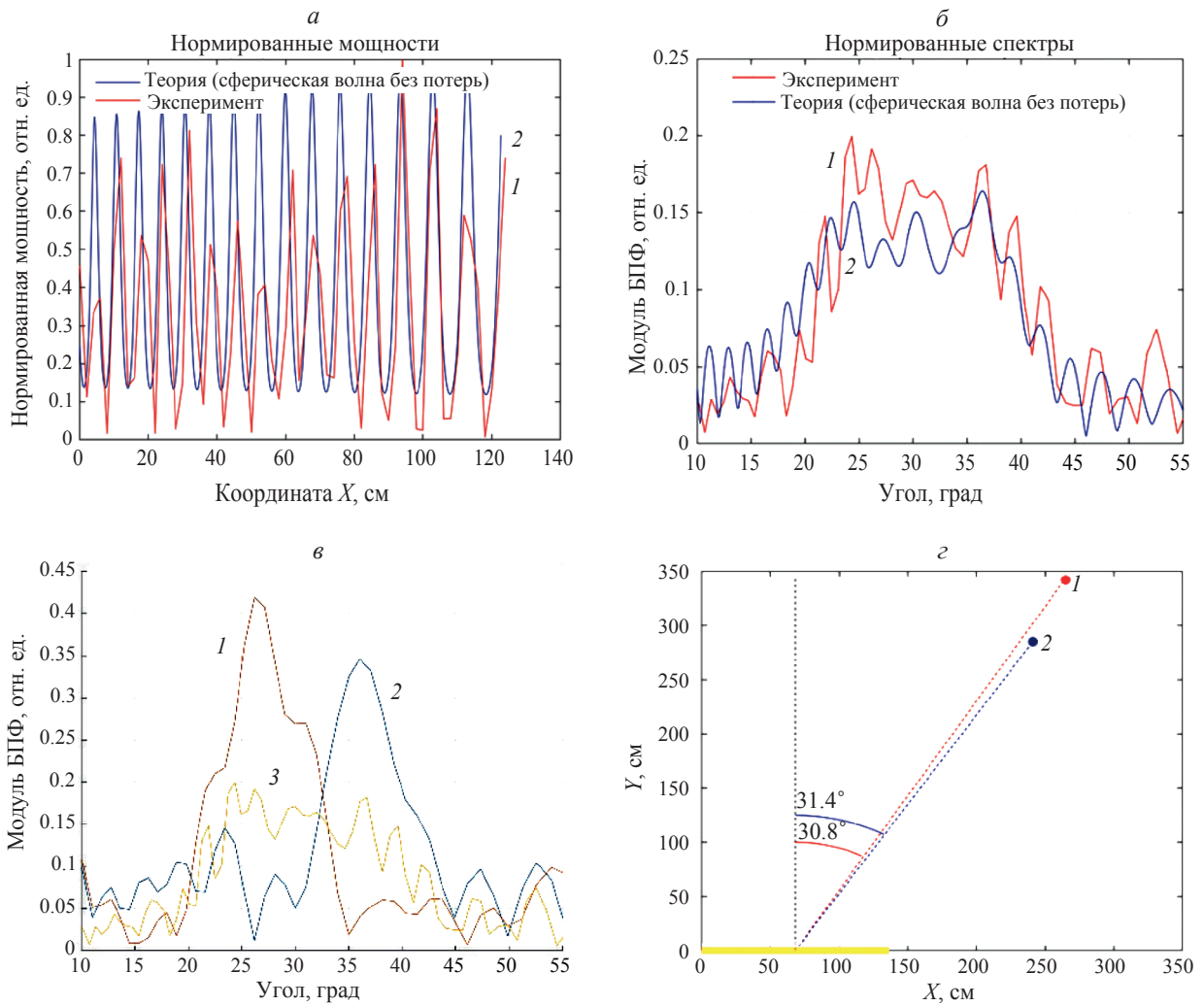


Рис. 3. Экспериментальные данные и результаты их обработки. Сравнение экспериментальных и теоретических интерференционных картин (а) и угловых спектров (б): 1 — эксперимент, 2 — теория (сферическая волна). Предложенный алгоритм обработки экспериментальных данных (в): 1, 2 — спектры данных, полученных с правой и левой половин антенной решетки, 3 — полный спектр для сравнения. Исходные и восстановленные координаты цели (г): 1 — истинное положение источника, 2 — восстановленное положение, желтая линия — антенная решетка.

приемной антенны (линейной антенной решеткой). Для небольших уровней шума (отношение сигнал/шум более 10–12 дБ) такой метод оценки угла прихода сигнала может быть приемлемым, однако для более зашумленных данных алгоритм обработки должен быть модифицирован.

Путем к определению истинных координат источника может служить решение уравнений максимального правдоподобия с использованием метода последовательных приближений. Первое приближение может быть получено путем деления массива данных интерференционной картины на две равные части, соответствующие правой и левой половинам антенной решетки. В ходе регистрации излучения каждая часть решетки обнаруживает источник под своим углом. В рассматриваемом случае эти углы составляют 26° и 36° согласно спектрам 1 и 2 на рис. 3в. Точка пересечения прямых линий, проходящих через середины половин антенной решетки под найденными углами, дает све-

дения о положении источника в первом приближении (рис. 3г). В рассматриваемом случае обработки данных измеренное значение угла поступления сигнала составляет 31,4 градуса. Таким образом, ошибка по углу оказывается менее 1°, а координаты x и y истинного (265,342) и восстановленного (241,285) источников различаются в пределах 10% и 20% соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача определения угла прихода отраженной волны на линейную антенную решетку. Предложена схема радиофотонного приемного устройства СВЧ для формирования и регистрации радиоголограмм. Проведено численное и экспериментальное исследования такого устройства. Предложен алгоритм обработки интерференционной картины для определения координат отражающего объекта в случае сферичности отраженной волны при недостаточном удалении приемника

от объекта. Массив данных с антенной решетки делится на две части для определения угла падения на каждую из них. Точка пересечения прямых, проходящих через середины половин антенной решетки под найденными углами, может быть использована в качестве первого приближения к истинным координатам отражающего объекта, которое может быть уточнено с использованием метода максимального правдоподобия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dong J., Zhang F., Jiao Z., Li W.* // Optics Express. 2020. V. 28. No. 13. Art. No. 19113.
2. *Pan S., Ye X., Zhang Y. et al.* // IEEE J. Microwaves. 2021. V. 1. No. 1. P. 176.
3. *Dong J., Sun Q., Jiao Z. et al.* // Photonics Res. 2022. V. 10. No. 7. P. 1679.
4. *Pan S., Zhang Y.* // J. Light. Technol. 2020. V. 38. P. 5450.
5. *Кулагин В.В., Валуев В.В., Конторов С.М. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 1. С. 91;
6. *Кулагин В.В., Валуев В.В., Конторов С.М. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 6. С. 895; *Kulagin V.V., Valuev V.V., Kontorov S.M. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 1. P. 70.
7. *Кулагин В.В., Валуев В.В., Буркитбаев Д. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 1. С. 49; *Kulagin V.V., Valuev V.V., Burkitbaev D. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 1. P. 40.
8. *Fan B., Zhang F., Ma C. et al.* // IEEE Photonics Technol. Lett. 2020. V. 32. No. 21. P. 1397.
9. *Zhang F., Guo Q., Wang Z. et al.* // Opt. Express. 2017. V. 25. No. 14. Art. No. 16274.
10. *Wang A., Wo J., Luo X. et al.* // Optics Express. 2018. V. 26. No. 16. Art. No. 20708.
11. *Valuev V.V., Kulagin V.V., Ryzhuk R.V. et al.* // 5th Int. Conf. TERA-2023. (Moscow, 2023). P. 125.
12. *Кулагин В.В., Валуев В.В., Каргин Н.И. и др.* // В сб. тр. «Мокеровские чтения». М.: НИЯУ МИФИ, 2023. 39 с.

Application of microwave photonics methods in the design of microwave receiving devices for the formation and registration of radio holograms

D. Burkitbayev^{a, *}, V. V. Kulagin^b, R. V. Ryzhuk^c, V. V. Valuev^c, V. A. Cherepenin^d

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Sternberg State Astronomical Institute, Moscow, 119991 Russia*

^c*National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, 115409 Russia*

^d*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125009*

**e-mail: daurendo@mail.ru*

A scheme for implementing a microwave photonics receiving device for microwave signals for the formation and registration of radio holograms is proposed. The operation of such a receiving device was studied numerically and experimentally. A data processing method is proposed to reduce the error in determining the source coordinates.

Keywords: microwave photonics, radio-photonics receiving channel, optical heterodyning