

Измерение наклона волнового фронта с применением радиофотонных технологий

© В.В. Валуев¹, В.В. Кулагин², Н.И. Каргин³, Р.В. Рыжук³

¹АО «НТЦ Модуль»

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
МГУ им. М.В. Ломоносова

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Рассмотрены вопросы применения радиофотонных технологий для создания фазометрических систем с большой базой. Экспериментально показана возможность измерения сдвига фазы на основе двойного параллельного модулятора Маха — Цандера. Проведены измерения угла наклона волнового фронта СВЧ-волны с частотой 7,5 ГГц.

Ключевые слова: радиофотоника, наклон волнового фронта, модулятор Маха — Цандера.

Введение. Проблема определения угла прихода (наклона волнового фронта) радиосигнала возникает во многих областях науки и техники. Предложено большое количество устройств, базирующихся на трех основных методах — сравнения амплитуд, сравнения времен прихода сигнала и интерферометрического сравнения фаз, а также на их различных модификациях. Потенциальная точность в схемах измерения фазы и задержки оказывается тем выше, чем больше измерительная база, что определяет их преимущество по сравнению с амплитудным методом. В то же время увеличение измерительной базы в этих схемах до сотен и тысяч метров сталкивается с существенными техническими трудностями при реализации с помощью традиционных СВЧ-элементов (из-за потерь в кабеле). Применение радиофотонных технологий открывает в этом случае широкие перспективы существенного увеличения точности оценки угла прихода радиосигнала за счет применения оптических волоконных линий, обеспечивающих требуемую длину измерительной базы, и радиофотонных элементов для обработки сигнала [1–6]. При этом такие системы способны обрабатывать не только узкополосные сигналы, но и сверхширокополосные сигналы с шириной полосы 6...8 ГГц и более, что обеспечивает сантиметровое разрешение по дальности при их использовании в радиолокационных установках [2, 7].

Экспериментальное определение наклона волнового фронта сигнала. Для измерения наклона волнового фронта (угла прихода волны) узкополосных радиосигналов в работах [8, 9] предложена радиотехническая реализация метода измерения распределения интенсивности, формируемой при интерференции падающей и опорной волн с частотой 7,5 ГГц. В этом случае необходимо регистрировать интенсивность в двух взаимно-перпендикулярных направлениях в нескольких десятках точек. В простейшем случае возможно определение величины наклона волнового фронта также и по измерению интенсивности в двух точках. На рис. 1 показано размещение передающей и приемной антенн в экспериментальной установке. Антенна могла перемещаться вдоль измерительной линейки, что позволяло последовательно определять распределение интенсивности интерференционной картины в разных точках. При этом опорная СВЧ-волна подмешивалась к принимаемой волне в радиотехнической схеме.

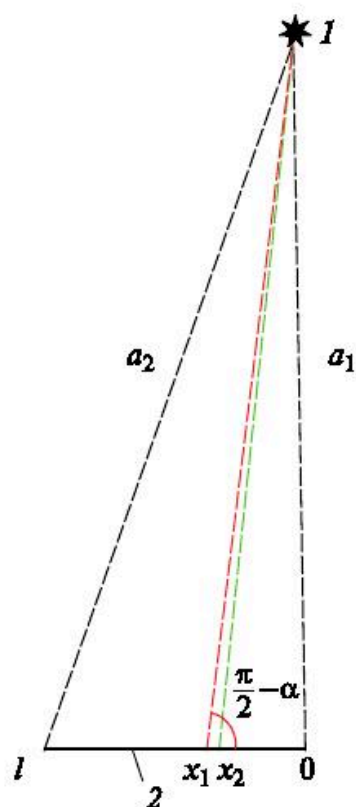


Рис. 1. Схема расположения передающей и приемной антенн и измерительной линейки:

1 — излучатель; 2 — приемная антенна; [0, l] — измерительная линейка; длина волны излучения 4 см, $a_1 = 213$ см, $a_2 = 225$ см, $l = 80$ см, α — угол прихода волны в точке $x_1 = 30$ см (по отношению к перпендикуляру к измерительной линейке)

Экспериментально полученное распределение интенсивности интерференционной картины вдоль измерительной линейки представлено на рис. 2. Для достаточно удаленного источника угол наклона волнового фронта один и тот же во всех точках измерительной линейки и график интенсивности должен иметь постоянный период. Однако в эксперименте [8, 9] угол наклона изменяется вдоль измерительной линейки

из-за недостаточно удаленного положения источника и, соответственно, сильной кривизны фронта падающей волны, что приводит к изменению периода колебаний интенсивности.

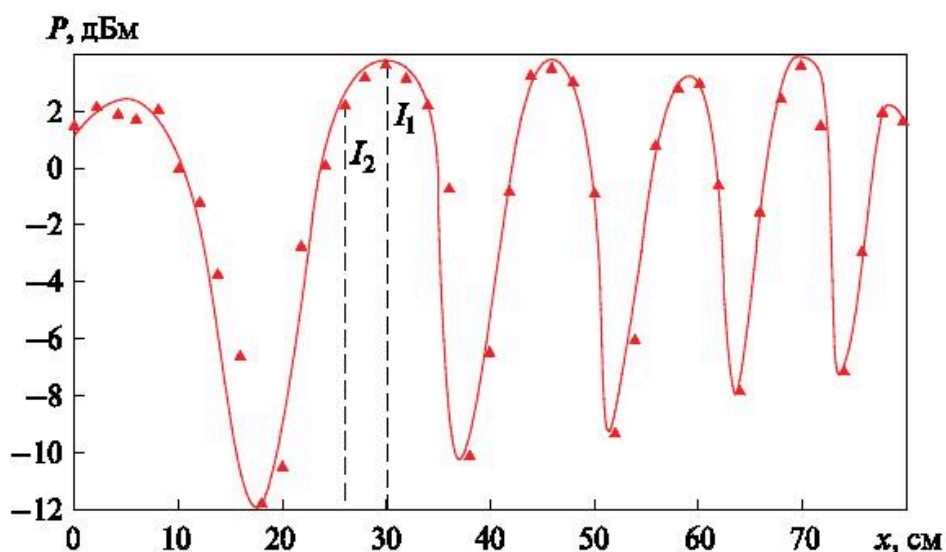


Рис. 2. Распределение интенсивности интерференционной картины вдоль измерительной линейки (непрерывная линия проведена для наглядности, интенсивность I_1 получена в точке x_1 (см. рис. 1), интенсивность I_2 — в точке $x_2 = 26$ см)

Наклон волнового фронта (рис. 3) можно определить по набегу фазы волны между двумя точками наблюдения x_1 и x_2 (см. рис. 1 и 2). В качестве опорной возьмем волну в точке x_1 . Тогда в этой точке интерференционной картины будет максимум I_1 (рис. 2). В точке $x_2 = 26$ см (точка 2 на рис. 3) набег фазы по отношению к точке x_1 будет больше на величину $\Delta\varphi = \varphi_1$. Этот набег фазы можно определить по формуле [8]

$$\Delta\varphi = \arccos\left(\frac{I_2}{I_1}\right). \quad (1)$$

Вычислив набег фазы $\Delta\varphi$ и зная расстояние l_1 между точками 1 и 2, можно определить угол наклона волнового фронта α по следующей формуле:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\Delta\varphi\lambda}{2\pi l_1}\right), \quad (2)$$

где λ — длина волны излучения. Необходимо отметить, что, поскольку измеряемое значение угла наклона волнового фронта зависит от длины волны излучения, неточность измерения λ , которая может быть связана также и со значительной шириной полосы сигнала, увеличивает ошибку определения α .

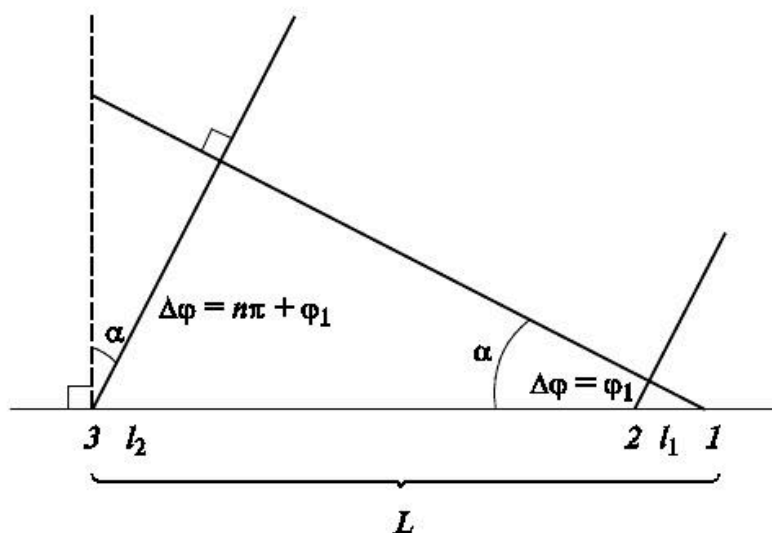


Рис. 3. Набег фаз волны в разных точках линии наблюдения:

1, 2 — точки на расстоянии l_1 с разностью фаз φ_1 для первоначального определения угла прихода волны; 3 — точка на расстоянии l_2 от точки 1 с разностью фаз $\Delta\varphi = n\pi + \varphi_2$

Радиофотонная схема измерения наклона волнового фронта сигнала [8, 9] показана на рис. 4.

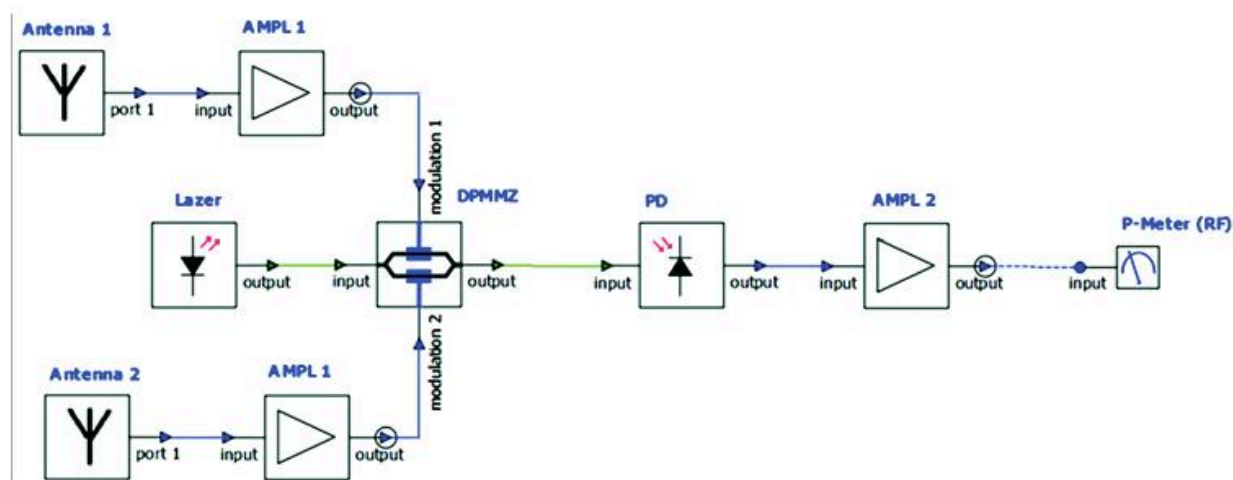


Рис. 4. Схема радиофотонного измерения разности фаз между СВЧ-волнами в двух точках измерительной линейки:

AMPL — усилители СВЧ-сигнала; DPMZ — двойной параллельный модулятор Маха — Цандера; PD — фотодетектор; R-Meter — измеритель мощности СВЧ-излучения

Волны в точках x_1 и x_2 регистрируются антеннами 1 и 2 и после переноса в оптическую область с помощью двойного параллельного модулятора Маха — Цандера складываются [10]. Сдвиг фазы $\Delta\varphi$ определяется по измерениям интенсивности на выходе фотодетектора.

Двухступенчатая процедура определения наклона волнового фронта. Двухступенчатая процедура определения наклона волнового фронта позволяет по измерениям интенсивности интерференционной картины в двух близких точках с расстоянием между ними, заведомо меньшим половины периода кривой изменения интенсивности, произвести первоначальное определение угла прихода волны. Затем, оценив ошибку измеренного значения α , проводят повторное измерение интерференционной картины в точках 1 и 3 (см. рис. 3), разделенных значительно большим расстоянием l_2 , и вычисляют уточненное значение α . Такая процедура позволяет существенно увеличить точность определения угла прихода волны за счет уменьшения ошибки измерения, связанной с величиной измерительной базы. Если после второго этапа полученная точность измерения α позволяет, второй этап может быть повторен несколько раз с соответствующим уточнением величины α .

Рассмотрим более детально метод определения наклона волнового фронта в два этапа. На первом этапе с помощью радиофотонной схемы (см. рис. 4) измеряют разность фаз между точками x_1 и x_2 (см. рис. 3). Для схемы эксперимента, показанной на рис. 1, 2 угол наклона волнового фронта в точке x_1 , вычисленный по геометрическим параметрам a_1 , a_2 и l , составлял $6,13^\circ$. Определим этот угол, исходя из отношения измеренных значений интенсивностей I_2 и I_1 (см. рис. 2), равного 0,72144. По формуле (1) фазовый набег $\Delta\varphi$ оказывается тогда равным $0,7606$ рад. Расстояние между точками x_1 и x_2 составляет 4 см, согласно рис. 2, длина волны равна тоже 4 см, поэтому по выражению (2) измеренный угол наклона волнового фронта α составляет $6,95^\circ$. Разность между вычисленным из геометрических характеристик и измеренным значениями составляет порядка $0,8^\circ$. Отличие измеренного значения от вычисленного вызвано погрешностью измерений используемых параметров, в частности интенсивности интерференционной картины, а также сильной кривизной фронта падающей волны из-за недостаточно удаленного положения источника излучения.

На втором этапе фазовый набег вычисляется между точками x_1 и x_3 (точками 1 и 3 на рис. 3). При этом точка x_3 вычисляется по найденному значению угла наклона α и точности его определения, а именно: максимальный фазовый набег между точками x_1 и x_3 может быть равен $\Delta\varphi = n\pi + \varphi_2$. Здесь величина φ_2 должна быть меньше π с учетом возможных отклонений за счет неточного первоначального определения α . В итоге наибольшая возможная точность определения угла прихода радиосигнала ограничивается ошибкой измерения длины волны, связанной в том числе с шириной полосы сигнала и сферичностью

волнового фронта. Необходимо отметить, что первоначальная точность определения угла прихода может быть значительно увеличена путем применения измерительной линейки, включающей несколько приемных антенн [8, 9]. Такая схема позволяет также убедиться в наличии только одного источника сигнала, что является обязательным условием для проведения второго этапа двухступенчатой процедуры определения наклона волнового фронта. При проведении экспериментов не было возможности существенно увеличить расстояние между точками x_1 и x_2 из-за ограниченности размеров помещения и сильного влияния сферичности волнового фронта.

Заключение. Предложена двухступенчатая процедура оценки угла прихода радиосигнала. Первоначально проводится определение угла по измерениям интенсивности интерференционной картины принимаемой и опорной волн в двух точках. Затем, на втором этапе, увеличивается длина измерительной базы и уточняется значение угла прихода. Измерение формируемого при интерференции падающей и опорной волн распределения интенсивности проводится с помощью радиофотонной реализации схемы. Проведен эксперимент для определения угла прихода по измерению интенсивности интерференционной картины в двух точках. Показано, что результаты измерений соответствуют расчетам, сделанным по геометрическим параметрам схемы эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Pan S., Zhang Y. Microwave photonic radars. *J. Lightw. Technol.* 2020, vol. 38, no. 19, pp. 5450–5484.
- [2] Chen H., Chan E.H.W. Angle of arrival measurement system using double RF modulation technique. *IEEE Photonics J.* 2019, vol. 11, no. 1, p. 7200110.
- [3] Li P., Yan L., Ye J. Angle-of-arrival estimation of microwave signals based on optical phase scanning. *J. Lightwave Technol.* 2019, vol. 37, no. 24, pp. 6048–6053.
- [4] Li P., Yan L., Ye J. Photonic approach for simultaneous measurements of Doppler-frequency-shift and angle-of-arrival of microwave signals. *Opt. Express.* 2019, vol. 27, no. 6, pp. 8709–8716.
- [5] Huang C., Chen H., Chan E.H.W. Simple photonics-based system for Doppler frequency shift and angle of arrival measurement. *Optics Express.* 2020, vol. 28, no. 9, pp. 14028–14037.
- [6] Yang Y., Ma C., Fan B. Photonics-Based Simultaneous Angle of Arrival and Frequency Measurement System With Multiple-Target Detection Capability. *J. Lightwave Technol.* 2021, vol. 39, no. 24, pp. 7656–7663.
- [7] Vidal B., Piqueras M.A., Marti J. Direction-of-arrival estimation of broadband microwave signals in phased-array antennas using photonic techniques. *J. Lightw. Technol.* 2006, vol. 24, no. 7, pp. 2741–2745.
- [8] Рыжук Р.В., Валуев В.В., Каргин Н.И. Исследование амплитудно-фазового распределения поля СВЧ излучателя с помощью голографического метода. *Сборник трудов «Мокеровские чтения»*. Москва, 2023, с. 51–53.

- [9] Буркитбаев Д., Валуев В.В., Кулагин В.В. Применение методов радиофотоники в проектировании приемных устройств СВЧ для формирования и регистрации радиоголограмм. *Сборник трудов XXXV Всероссийской школы-семинара «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова («Волны-2024»)*. 2024, с. 159–162.
- [10] Валуев В.В., Гуляев Ю.В., Конторов С.М. Универсальный радиофотонный приемный канал микроволнового диапазона. *Радиотехника и электроника*. 2018, т. 63, № 9, с. 1020–1028.

Валуев Виктор Васильевич — д-р техн. наук, главный научный сотрудник АО «НТЦ Модуль». e-mail: valuevsu@rambler.ru

Кулагин Виктор Владимирович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова. e-mail: victorvkulagin@yandex.ru

Каргин Николай Иванович — д-р техн. наук, профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». e-mail: krgn@yandex.ru

Рыжук Роман Валериевич — канд. физ.-мат. наук, доцент Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». e-mail: ryzhuk-rom@yandex.ru

Wavefront tilt measurement using microwave photonics technologies

© V.V. Valuev¹, V.V. Kulagin², N.I. Kargin³, R.V. Ryzhuk³

¹ Research Centre “Module”

² Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University

³ National Research Nuclear University MEPhI

The paper considers the application of microwave photonics technologies to create phase measuring systems with a large baselength. The possibility of measuring the phase shift based on a dual parallel Mach-Zehnder modulator has been experimentally demonstrated. The tilt angle of the microwave wave front with a frequency of 7.5 GHz was measured.

Keywords: microwave photonics, wavefront tilt, Mach-Zehnder modulator.

Valuev V.V., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher at the Research Centre “Module”.
e-mail: valuevsu@rambler.ru

Kulagin V.V., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher at the Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University. e-mail: victorvkulagin@yandex.ru

Kargin N.I., Dr. Sci. (Eng.), Prof. at the National Research Nuclear University MEPhI.
e-mail: krgn@yandex.ru

Ryzhuk R.V., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Assoc. Prof. at the National Research Nuclear University MEPhI. e-mail: ryzhuk-rom@yandex.ru