

# ШИРОКОПОЛОСНЫЕ КОГЕРЕНТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАТРИЧНОЙ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ПРИЗЕМНЫХ ТРАСС В 3-см ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН

Зайцев К. И.<sup>1</sup>, Мягков А. С.<sup>2</sup>, Новиков А. В.<sup>1</sup>, Носов Д. М.<sup>2</sup>, Осипов М. В.<sup>2</sup>, Сурков А. С.<sup>2</sup>,  
Христенко А. В.<sup>2</sup>, Акулиничев Ю. П.<sup>1</sup>, Ровкин М. Е.<sup>2</sup>, Хлусов В. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»  
пр. Ленина, 40, г. Томск, 634050, Россия

<sup>2</sup>ЗАО «НПФ «Микран»  
ул. Вершинина, 47, г. Томск, 634045, Россия  
тел.: 382-2-413562, e-mail: hva@micran.ru

**Аннотация** — Проведены когерентные экспериментальные измерения матричной функции отклика двух приземных трасс, протяженностью 24 и 30 км., с известным высотным рельефом. Точность оценки формируемых функций отклика определялась широкой полосой зондирующего неполяризованного сигнала, равной 320 МГц. Полное поляризационное зондирование радиоканала реализовано с использованием двух ортогональных по поляризации и некоррелированных ЛЧМ-сигналов со встречным законом модуляции. Временное разрешение формируемых функций отклика равнялось 3 нс. Получены характеристики изменчивости матричных функций отклика исследуемых трасс на секундных интервалах. Совокупность результатов данной работы может быть полезна при решении связанных задач.

## I. Введение

Пропускная информационная способность радиоканала во многом определяется его функцией отклика, которая, в свою очередь, зависит от наличия неоднородностей в канале распространения радиоволн и геометрии их взаимного расположения. В силу поперечного характера электромагнитной волны полную информацию о свойствах канала несет его 2x2 матричная функция отклика (МФО)  $G(t)$ , отображающая спектр задержек распространения по основным и кроссовым поляризационным составляющим радиосигнала. Знание матричной функции отклика и параметров ее временной изменчивости позволяет производить адаптацию связанной системы к условиям распространения радиоволн, повышая надежность и пропускную способность системы связи. Оперативная оценка функции  $G(t)$  радиоканала может быть получена путем его зондирования широкополосным, неполяризованным векторным радиосигналом  $e_0(t)$  и сравнении с ним принимаемого векторного радиосигнала  $e_p(t) = G(t) * e_0(t)$ , в соответствии с выражением

$$J(t) = e_p(t) \otimes e_0^\dagger(t) = G(t) * e_0(t) \otimes e_0^\dagger(t), \quad (1)$$

где: \* — знак временной свертки матричной  $G(t)$  и векторной  $e_0(t)$  функций времени,  $\otimes$  — знак временной свертки двух векторных функций  $e_p(t)$  и  $e_0(t)$  с умножением по Кронекеру,  $\dagger$  — знак эрмитового сопряжения [1]. Формируемая матричная функция  $J(t)$  является корректной оценкой матричной импульсной функции отклика  $G(t)$  при выполнении соотношения

$$M = e_0(t) \otimes e_0^\dagger(t) = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \end{bmatrix} \otimes (s_1^*(t-t'); s_2^*(t-t')) \approx \begin{bmatrix} \dot{B}_{11}(t') & 0 \\ 0 & \dot{B}_{22}(t') \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\square \square$  — операция усреднения,  $\dot{B}_{11}(t'), \dot{B}_{22}(t')$  —

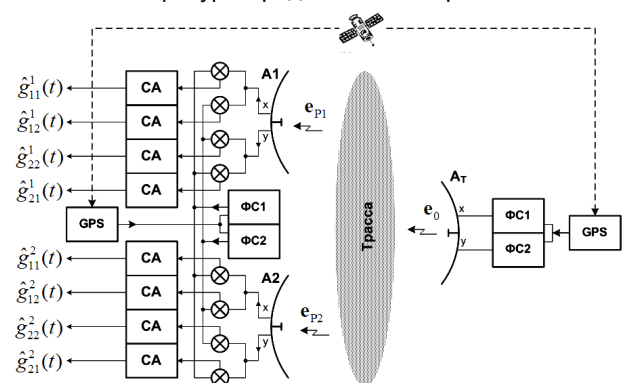
автокорреляционные функции сигналов  $s_1(t), s_2(t)$ , соответственно. Из выражения (2) следует, что сигналы  $s_1(t), s_2(t)$ , формирующие временную структуру ортогональных по поляризации компонент излученного векторного радиосигнала  $e_0(t)$ , должны быть не коррелированы для всех возможных временных сдвигов:

$$\frac{\square s_1(t) \cdot s_2(t) \square}{\square |s_1(t)|^2 \square + \square |s_2(t)|^2 \square} \rightarrow 0. \quad (3)$$

Для таких сигналов формируемая матричная функция  $J(t)$  в выражении (1) равна

$$J(t) = G(t) * M = \begin{pmatrix} g_{11}(t) & g_{12}(t) \\ g_{21}(t) & g_{22}(t) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} B_{11}(t') & 0 \\ 0 & B_{22}(t') \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11}(t) * B_{11}(t'); & g_{12}(t) * B_{22}(t') \\ g_{21}(t) * B_{11}(t'); & g_{22}(t) * B_{22}(t') \end{pmatrix} = \hat{G}(t), \quad (4)$$

и поскольку автокорреляционные функции сигналов  $s_1(t), s_2(t)$  известны, матричная функция  $J(t)$  есть корректная оценка матричной функции отклика  $G(t)$ . В настоящей работе приведены результаты экспериментальных измерений матричной функции отклика в соответствии с алгоритмом, описываемым выражением (1). Обобщенная схема экспериментальной аппаратуры представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Обобщенная схема аппаратуры.**  
FC1 — формирователь ЛЧМ-сигнала  $S_1(t)$ ,  
FC2 — формирователь ЛЧМ-сигнала  $S_2(t)$ ,  
CA — спектроанализатор, GPS — приемник спутниковых сигналов.

**Fig. 1. Generalized diagram of the equipment:** FC1 – a former of FMCW signal  $S_1(t)$ , FC2 – a former of FMCW signal  $S_2(t)$ , CA – a spectrum analyzer, GPS – a satellite navigation signal receiver

В качестве пары ортогональных сигналов  $s_1(t), s_2(t)$  использованы непрерывные ЛЧМ-сигналы с симметричным и встречным законом модуляции частоты, с

шириной спектра 320 МГц и длительностью периода модуляции 6,9 мс. Организовано два пространственно разнесенных канала приема А1 и А2. Обработка сигналов на приеме гомодинальная. Синхронизация опорных ЛЧМ-сигналов приемных каналов относительно сигнала излучения осуществляется по спутниковым сигналам точного времени, путем синхронизации рубидиевых стандартов частоты. Это обеспечило возможность когерентных измерений на секундном интервале наблюдения принимаемых сигналов.

## II. Результаты измерений

На рис. 2 представлены результаты экспериментальной оценки МФО приземной полузакрытой трассы протяженностью 24 км.

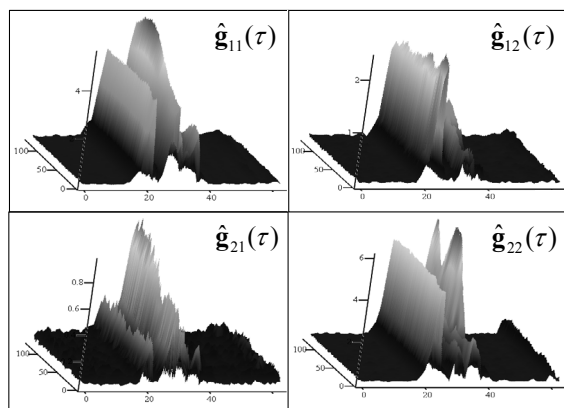


Рис. 2. Ансамбль из 128 реализаций МФО приземной трассы (24 км), зафиксированных через 6,9 мс.

Fig. 2. The ensemble of 128 MFR realizations at surface trace (24 km) registered every 6.9 ms

Аналогичные результаты для другой полузакрытой трассы протяженностью 30 км представлены на рис. 3.

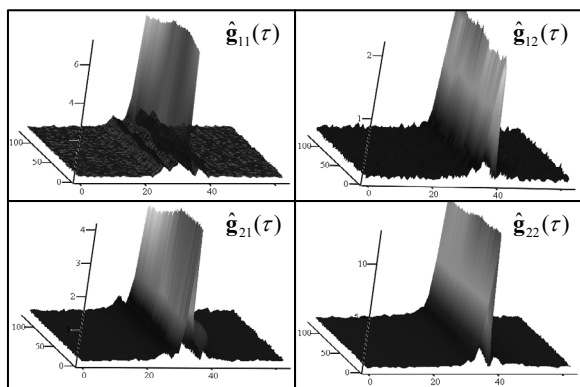


Рис. 3. Ансамбль из 128 реализаций МФО приземной трассы (30 км), зафиксированных через 6,9 мс.

Fig. 3. The ensemble of 128 MFR realizations at surface trace (30 km) registered every 6.9 ms

## III. Интерпретация результатов измерений

Данные рис. 2 и 3 позволяет говорить о хорошем соответствии параметров аппаратуры расчетным. Это в свою очередь, делает репрезентативными следующие краткие выводы: 1) характеристики измеренных трасс принципиально различны; 2) на 24 км. трассе отчетливо выявляется трехлучевое распространение сигнала, причем флуктуации сигнала по разным лучам независимы; 3) на трассе 30 км. однолучевое распространение; 4) для обеих трасс

характерна существенная деполаризация сигнала. Сравнение огибающих МФО в каналах пространственного разнесения не выявило принципиальных отличий. Аргументы этих функций существенно различались, что свидетельствует о неоднородности фазового фронта принимаемой радиоволны на интервале пространственного разнесения.

## IV. Заключение

На основе доступной элементной базы в X-диапазоне реализована прецизионная аппаратура детальной диагностики параметров приземных трасс в широкой полосе частот. Аппаратура без значительных затрат может быть адаптирована для исследований в других диапазонах.

Работа проведена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям, госконтракт № 02.740.11.0232.

## V. Список литературы

- [1] Хлусов В. А. Теория и методы обработки векторных сигналов в поляризационных радиолокационных системах: дисс. ... д-ра техн. наук. ТУСУР, Томск, 2004. 257 с.

## WIDE-BAND COHERENT MEASUREMENTS OF THE MATRIX RESPONSE FUNCTION OF SURFACE TRACES AT X-BAND

Zaytsev K. I.<sup>1</sup>, Myagkov A. S.<sup>2</sup>, Novikov A. V.<sup>1</sup>, Nosov D. M.<sup>2</sup>, Osipov M. V.<sup>2</sup>, Surkov A. S.<sup>2</sup>, Hristenko A. V.<sup>2</sup>, Akulinichev Yu. P.<sup>1</sup>, Rovkin M. E.<sup>2</sup>, Hlusov V. A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University of the Control Systems and Radioelectronics

40, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

<sup>2</sup>MICRAN Co

47, Vershinin str., Tomsk, 634045, Russia

Ph.: 7-382-2-413562, e-mail: hva@micran.ru

**Abstract** — Coherent experimental measurements of the matrix response function for two surface traces of 24 and 30 km long were carried out.

## I. Introduction

The equipment of the full polarization sounding of surface traces is described. The estimate algorithm of the matrix response function  $\mathbf{G}(t)$  (MRF) is described by ratio (1), and requirements of a radiated signal  $\mathbf{e}_0(t)$  — by ratio (2). Nonpolarized radiation  $\mathbf{e}_0(t)$  is realized with using of two orthogonal FMCW signals  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$  with bandwidth of 320 MHz [1]. The equipment block diagram is presented on Fig. 1.

## II, III. Main Part

The results of the measurements of the MRF are presented on fig. 2 for the trace of 24 km long, and on fig. 3 for 30-km trace. Analysis and comparison of the results of the measurements of MRF demonstrate good compliance of the equipment parameters with the formula values. Data of fig.2 and 3 allows making the conclusion: 1) characteristics of the estimated traces are fundamentally different; 2) three-ray propagation of the signal becomes clearly at 24-km trace, and fluctuations of the signal are independent at different rays; 3) there are single-beam propagation at the 30 km trace; 4) essential depolarization of the signal is typical for both traces. Comparison of MRF envelopes at the channels with spatial diversity does not reveal principal difference. Arguments of these functions are essentially different; it testifies irregularities of the phase front of the received radio wave at the interval of the spatial diversity.

## IV. Conclusion

The precision equipment for detail diagnostics of surface traces at X-band in wide bandwidth (320 MHz) was realized on the basis of available electronic components. The equipment can be adapted for research in other frequency bands.