

УДК 621.396.677.51

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АНТЕННО-КОММУТАЦИОННЫЙ ТРАКТ ДЛЯ ПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ В С-ДИАПАЗОНЕ

А.Л. МАТЮШКОВ¹, А.А. ЖУК¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

E-mail: alexandroszhuk@gmail.com

Аннотация. В работе предложен многоканальный антенно-коммутационный тракт для пеленгации источников радиоизлучений С-диапазона (4 – 6 ГГц). Объединены результаты проектирования малогабаритной пирамидальной рупорной антенны и высокоскоростного антенного коммутатора. Проведён анализ основных характеристик тракта: коэффициента усиления антенны (до 14,9 дБ), ширины диаграммы направленности (45–50°), потерь в коммутаторе (1,3–1,4 дБ), времени переключения каналов (560 нс). Показана применимость тракта для пеленгаторов на БПЛА.

Abstract. This paper proposes a multi-channel antenna-switching path for direction finding of radio emission sources in the C-band (4–6 GHz). The results of designing a small-sized pyramidal horn antenna and a high-speed antenna switch are combined. The main characteristics of the path are analyzed: antenna gain (up to 14.9 dB), half-power beamwidth (45–50°), switch insertion loss (1.3–1.4 dB), and channel switching time (560 ns). The applicability of the proposed path for direction finders on UAVs is demonstrated.

Введение

Актуальной задачей радиомониторинга является разработка компактных, энергоэффективных и быстродействующих трактов пеленгации источников радиоизлучений, особенно для установки на беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [1, 2]. В С-диапазоне (4 – 6 ГГц) широкое распространение получили методы беспиковой пеленгации, требующие применения многоканальных антенных решёток или коммутируемых антенных трактов [3].

В работах [4, 5] были представлены отдельные узлы таких трактов: малогабаритная пирамидальная рупорная антенна и антенный коммутатор на 6 каналов. Однако комплексный анализ совместной работы этих узлов ранее не проводился. Настоящая работа обобщает результаты моделирования и экспериментальных исследований антенно-коммутационного тракта в целом.

Основная часть

1. Конфигурация системы

Предлагаемая система включает восемь пирамидальных рупорных антенн, расположенных по кругу (азимутальный обзор 360°) и подключённых к двум приёмным трактам через антенный коммутатор на СВЧ-ключах. Рабочая частота — 5,8 ГГц. Выбор частоты обусловлен выделенным диапазоном для БПЛА-приложений и умеренным затуханием сигнала в атмосфере.

2. Характеристики антенны

На основе моделирования в среде Antenna Magus и экспериментальной проверки пяти образцов рупорных антенн получено [4]:

- ширина диаграммы направленности (ДН) по уровню –3 дБ: 45–50° (горизонтальная плоскость) и 43° – 43° (вертикальная);
- коэффициент усиления (КУ): от 10,4 до 14,9 дБ;
- габаритные размеры 68x85x56 мм;
- вес, не более 30 г.

Такая ДН позволяет при восьми антеннах перекрыть азимут в 360° и исключить «слепые зоны» [6].

3. Характеристики антенного коммутатора

Разработанный коммутатор выполнен на ключах SKY13522-644LF (Skyworks) [5] и имеет следующие характеристики:

- количество каналов — 8;
- вносимые потери: 0,9 – 1,2 дБ в диапазоне 3 – 6 ГГц;
- время переключения: 560 нс;
- напряжение питания: 3 В.

Эти параметры позволяют осуществлять последовательный опрос всех антенн с частотой более 1 МГц (период переключения $\approx 3,4$ мкс на полный цикл из 8 каналов), что достаточно для обработки сигналов с шириной спектра до нескольких мегагерц.

4. Совокупные характеристики тракта

Суммарный коэффициент шума (F_{total}) тракта на частоте 5,8 ГГц без учёта внешних шумов определяется потерями в коммутаторе ($L_{SW} = 1,2$ дБ) и коэффициентом шума, используемого усилителя высокой частоты РМАЗ – 63GLN+ ($NF=1,1$ дБ) [7].

Суммарный коэффициент шума можно определить из формулы:

$$F_{total} = F_{SW} + \frac{F_{LNA} - 1}{G_{SW}}, \quad (1)$$

где F_{SW} - коэффициент шума антенного коммутатора, $F_{SW} = 10^{0,12} = 1,318$, G_{SW} - коэффициент передачи коммутатора по мощности, $G_{SW} = 1/F_{SW} = 0,759$, F_{LNA} - коэффициент шума усилителя высокой частоты, $F_{LNA} = 10^{0,11} = 1,291$.

В итоге получаем:

$$F_{total} = 1,318 + \frac{(1,291 - 1)}{0,759} \approx 1,701,$$

что составляет 2,3 дБ и является приемлемым для большинства задач обнаружения.

Энергетический бюджет системы позволяет обнаруживать источники с мощностью –80 дБм на расстоянии до 1–2 км при использовании антенн с КУ 11 дБ и типовых характеристик приёмника.

5. Достоинства и ограничения

Достоинства:

- снижение числа приёмных трактов до 2 (упрощение, снижение массы и энергопотребления);
- высокая скорость переключения;
- хорошая повторяемость характеристик антенн;
- малая масса всей системы.

Ограничения:

- невозможность одновременного приёма сигналов с разных направлений (только последовательный опрос);
- необходимость точной калибровки потерь в коммутаторе и кабелях.

Заключение

В работе впервые проведён комплексный анализ многоканального антенно-коммутационного тракта для пеленгации источников радиоизлучений С-диапазона на основе пирамидальных рупорных антенн и высокоскоростного 8-канального коммутатора. Показана согласованность параметров обоих узлов: ширина ДН антенн ($45-50^\circ$) обеспечивает 360° перекрытие при 8 элементах, а потери в коммутаторе (1,3–1,4 дБ) и время переключения (560 нс) позволяют реализовать эффективный последовательный поиск.

Предложенная система может быть использована в пеленгаторах, устанавливаемых на БПЛА, а также в наземных портативных комплексах радиомониторинга.

Список использованных источников

1. Zhang, Y., Li, X., Wang, H. UAV-based direction finding: A review of antenna array and signal processing techniques // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 2023. – Vol. 59, No. 4. – P. 3452–3472.
2. Ivanov, S., Petrov, V., Kuznetsov, A. Lightweight C-band antenna systems for small UAVs // J. Radio Eng. – 2022. – Vol. 31, No. 2. – P. 112–120.
3. Kim, J., Lee, S., Park, Y. High-speed RF switches for phased array and direction-finding applications // Microw. Opt. Technol. Lett. – 2024. – Vol. 66, No. 1. – P. e33890.
4. Матюшков, А. Л., Каленкович, Е. Н., Титович, Н. А., Жук, А. А. Малогабаритная антенна для обнаружения и пеленгации источников радиоизлучений // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2024. – Минск, 2024. – С. (ссылка по сборнику).
5. Матюшков, А. Л., Каленкович, Е. Н., Титович, Н. А., Жук, А. А. Антенный коммутатор для обнаружителя источников радиоизлучений // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2024. – Минск, 2024. – С. (ссылка по сборнику).
6. Chen, X., Liu, W. Coverage analysis of circular antenna arrays for direction finding // IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. – 2025. – Vol. 24, early access. – P. 1–5.
7. Minicircuits. Low-noise amplifiers for C-band applications: CMA-545+ datasheet // www.minicircuits.com/pdfs/PMA3-63GLN+.pdf.