

АНТЕННЫ, СВЧ-УСТРОЙСТВА И ИХ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 629.78

ОЦЕНКА ДОСТИЖИМОЙ ТОЧНОСТИ ЮСТИРОВКИ АНТЕННЫ РАДИОТЕЛЕСКОПА RT-7,5 МЕТОДОМ АМПЛИТУДНОЙ ПЕЛЕНГАЦИИ ПО СИГНАЛАМ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И.Б. Власов, В.С. Рыжов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: vlasovbmstu@mail.ru

Рассмотрена возможность применения спутниковых радионавигационных сигналов для юстировки крупноапертурных зеркальных антенн. Получена оценка потенциальной точности амплитудной пеленгации методом максимума по сигналам радионавигационных космических аппаратов для антенны RT-7,5. Исследовано влияние турбулентной атмосферы Земли на точность юстировки. Рассмотрены основные факторы, снижающие точность амплитудной пеленгации в турбулентной атмосфере. Приведены выражения для оценки глубины замираний поля. Представлены описание экспериментальной установки на базе антенны RT-7,5 и метод оценки глубины замираний поля. Получены экспериментальные данные о глубине замираний поля при распространении радионавигационного сигнала в атмосфере. Выполнена оценка аддитивной составляющей флуктуации мощности сигнала на выходе экспериментальной установки и оценка среднеквадратической ошибки пеленгации для антенны радиотелескопа RT-7,5.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, юстировка антенн, амплитудная пеленгация, турбулентная атмосфера.

THE ATTAINABLE ACCURACY OF THE RT-7.5 RADIO TELESCOPE ANTENNA ALIGNMENT USING THE NAVIGATION SATELLITES

I.B. Vlasov, V.S. Ryzhov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: vlasovbmstu@mail.ru

The article discusses the possibility of using satellite navigation signals for alignment large aperture reflector antennas. The potential accuracy of the amplitude direction finding is estimated with the help of the maximum estimation method according to the radio-navigation spacecraft signals for RT-7.5 antenna. The effect of the Earth's turbulent atmosphere on the antenna alignment accuracy is investigated. The main factors that reduce the accuracy of the amplitude direction finding in the Earth's turbulent atmosphere are considered. The expressions for estimating the depth of field fading are given. The description of the experimental setup based on RT-7.5 antenna and the method for estimating the depth of field fading are presented. Experimental data of the field fading during the process of radio navigation signal propagation in the Earth's atmosphere are obtained. The paper presents the results of estimating the additive component of the signal power fluctuations at the experimental setup output. It also considers the estimation of the root-mean-square error of the direction finding for the antenna of RT-7.5 radio telescope.

Keywords: global navigation satellite systems, antenna alignment, amplitude direction finding, turbulent atmosphere.

Юстировка антенн радиотелескопов является одной из важнейших задач, возникающих при их эксплуатации. Юстировка подразумевает комплекс мер, направленных на минимизацию угловой ошибки наведения электрической оси антенны в заданную точку небесной полусферы.

Основной составляющей полной ошибки наведения крупноапертурных зеркальных антенн является систематическая ошибка, связанная с механическими погрешностями монтировки.

Приемлемой ошибкой наведения направленной антенны считается ошибка, не превосходящая 10 % ширины диаграммы направленности (ДН) по уровню половинной мощности, что эквивалентно снижению коэффициента усиления антенны G не более, чем на 0,12 дБ при гауссовой аппроксимации главного лепестка ДН.

Широко применяемым методом юстировки крупноапертурных зеркальных антенн является так называемый метод радиоюстировки по радиоизлучению космических источников как естественного, так и искусственного происхождения с известными небесными координатами. К преимуществам метода можно отнести достаточность использования штатной радиоприемной аппаратуры, заведомое расположение радиоисточника в дальней зоне приемной антенны, а также широкий диапазон доступных угловых положений электрической оси.

Метод радиоюстировки подразумевает определение разности (поправки) координат точечного радиоисточника в системе координат приемной антенны радиотелескопа и местной горизонтальной системе координат. Таким образом, в случае альт-азимутальной монтировки для каждой точки полусферы необходимо определить поправки координат по азимуту $\Delta A(A, Z)$ и зенитному углу $\Delta Z(A, Z)$, которые затем добавляются к рассчитанным значениям азимута и зенитного угла радиоисточника в местной горизонтальной системе координат. Далее значения координат с поправками передаются в систему наведения антенны.

Идеальными радиоисточниками для задачи юстировки являлись бы радиомаяки, занимающие различное угловое положение в дальней зоне исследуемой антенны. Такими радиоисточниками можно считать группировки космических аппаратов (КА) спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS, передающие непрерывные фазоманипулированные сигналы.

Особенности орбиты радионавигационных КА, а также их общее число (по состоянию на январь 2015 г. — 28 КА в составе орбитальной группировки ГЛОНАСС и 32 КА в составе GPS) делают возможным в любой момент времени наблюдать над горизонтом большое число точечных источников радиоизлучения примерно одинаковой мощности

с известными координатами. Максимальная угловая скорость радионавигационных КА, находящихся на средневысотной орбите составляет $\sim 0,5$ угл. мин/с, что позволяет сопровождать такие КА практически любым полноповоротным радиотелескопом, в том числе и РТ-7,5 [1, 2].

Применение стандартной аппаратуры потребителя, реализующей оптимальный (когерентный) алгоритм приема навигационного сигнала, в отличие от некогерентного накопления, позволяет получить отношение сигнал/шум q на выходе примерно на 30 дБ большее за счет сжатия частотного спектра фазоманипулированного сигнала. Однако, как будет показано далее, более простое в реализации некогерентное накопление сигнала в сочетании с высоким коэффициентом усиления зеркальной антенны РТ-7,5 ($G = 40$ дБ на частоте $f = 1602$ МГц [3]) позволяет получить достаточное для целей радиюстировки отношение сигнал/шум.

Потенциальная точность амплитудной пеленгации. Существует несколько методов радиопеленгации — определения направления на источник радиоизлучения в системе координат приемной антенны. Для одиночных однолучевых сканирующих антенн может быть применен только амплитудный метод радиопеленгации по максимуму сигнала.

Амплитудная пеленгация методом максимума осуществляется путем совмещения направления максимума пеленгационной характеристики с направлением на пеленгуемый объект в результате плавного вращения ДН антенны; пеленг отсчитывается в тот момент, когда мощность сигнала на выходе приемника становится максимальной. Для определения пеленга по азимуту и зенитному углу осуществляется последовательное вращение (сканирование) ДН антенны в двух ортогональных плоскостях.

Для повышения точности пеленгации как точечных, так и дискретных источников проводится построчное “взвешивание” выходного сигнала приемника с нахождением отклонения “центра тяжести” строки сканирования от ее расчетного центра. Координаты “центра тяжести” сигнала от источника в масштабе строки определяются следующим образом:

$$x_{A,Z} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i \Delta A_i (\Delta Z_i)}{\sum_{i=1}^N v_i}, \quad (1)$$

где N — число отсчетов выходного сигнала приемника по строке; v_i — i -й отсчет сигнала с выхода приемника; $\Delta A_i (\Delta Z_i)$ — координата i -го отсчета от центра строки.

Потенциальная точность или среднеквадратическое значение угловой ошибки данного метода по одной координате будет определяться следующим образом [4, 5]:

$$\sigma_{\Pi} = \frac{\theta_{0,5}}{\sqrt{2\pi qN}}, \quad (2)$$

где $\theta_{0,5}$ — ширина ДН по уровню половинной мощности; q — отношение сигнал/шум по мощности, приходящееся на один отсчет сигнала; N — число интегрируемых отсчетов.

Минимально допустимый уровень мощности радионавигационного сигнала ГЛОНАСС на выходе изотропной антенны с согласованной поляризацией у поверхности земли составляет $P_{\min} = -161$ дБ·Вт [6].

Отношение сигнал/шум на выходе измерителя мощности приемника в случае некогерентного накопления сигнала определяется как [7]

$$q = \frac{T_a}{T_c} \sqrt{\Delta f \Delta t}, \quad (3)$$

где T_a — антенная температура, обусловленная источником; T_c — шумовая температура приемной системы; Δf — эффективная ширина полосы принимаемых частот; Δt — время накопления сигнала.

Антенная температура может быть найдена следующим образом:

$$T_a = \frac{P_a}{k_B \Delta f}, \quad (4)$$

здесь P_a — мощность сигнала на выходе антенны; $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, в свою очередь

$$P_a = P_{\min} G, \quad (5)$$

где G — коэффициент усиления приемной антенны.

Окончательное выражение для оценки отношения сигнал/шум будет иметь вид

$$q = \frac{P_{\min} G}{k_B T_c} \sqrt{\frac{\Delta t}{\Delta f}}. \quad (6)$$

Для антенны РТ-7,5 в диапазоне L1 ($f = 1602$ МГц) коэффициент усиления антенны $G = 40$ дБ, шумовая температура системы $T_c = 200$ К. Принимая $\Delta t = 0,1$ с, $\Delta f = 1$ МГц можно получить, что $q = 50$ дБ.

Принимая угловую скорость вращения ДН антенны $v = 400$ угл. с/с, ширину ДН антенны $\theta_{0,5} = 2$ град. и размер кадра сканирования, равного ширине ДН, можно оценить число отсчетов выходного сигнала в строке следующим выражением:

$$N = \frac{\theta_{0,5}}{v \Delta t}. \quad (7)$$

Для указанных значений параметров сканирования $N = 180$.

Таким образом, потенциальная точность амплитудной пеленгации методом максимума по радионавигационным сигналам для антенны РТ-7,5 по формуле (2) в случае некогерентного накопления составит $\sigma_{\Pi} = 0,7$ угл. с.

Факторы, снижающие точность амплитудной пеленгации в турбулентной атмосфере Земли. Основным параметром, влияющим на распространение электромагнитных волн спутникового радионавигационного диапазона ($\lambda = 15 \dots 30$ см), является показатель преломления атмосферы. Атмосферу Земли можно разделить на две области: тропосферу и ионосферу. Показатель преломления тропосферы зависит от давления, температуры и влажности. В области ионосферы показатель преломления зависит от электронной концентрации и частоты.

Показатель преломления тропосферы и ионосферы Земли испытывает флуктуации, обусловленные турбулентными процессами в среде. Это приводит к двум факторам, снижающим точность амплитудной пеленгации методом максимума. Перемещение неоднородностей показателя преломления и их изменения во времени, во-первых, приводят к флуктуациям фазы и вариации углов прихода радиоволн; а во-вторых, к флуктуациям амплитуды из-за частичного рассеяния радиоволн в среде.

Теория [5] дает следующее выражение для оценки дисперсии флуктуаций угла прихода волны:

$$\sigma_{\Phi}^2 = 4\sqrt{\pi} \langle \Delta n^2 \rangle \frac{L}{b}, \quad (8)$$

где $\langle \Delta n^2 \rangle$ — дисперсия флуктуаций показателя преломления; L — длина пути радиоволны в области атмосферы Земли, в которой имеют место флуктуации показателя преломления; b — масштаб неоднородностей.

Теоретическое выражение (8) для вариации углов прихода радиоволн содержит характеристики неоднородностей показателя преломления атмосферы, которые часто неизвестны. Сопоставление результатов теории с экспериментальными данными позволяет дать следующие простые формулы для оценок вариаций углов прихода радиоволн. Ионосферные вариации углов прихода радиоволн:

$$\sigma_{\Phi_{\text{и}}} = \frac{X_1 \lambda^2}{\sqrt{\cos \alpha}}, \quad (9)$$

где $X_1 = 0,1 \dots 0,3$ угл. мин/м². Значение $X_1 = 0,1$ угл. мин/м² — среднее, а $X_1 = 0,3$ угл. мин/м² — для максимальных наблюдений вариаций углов прихода радиоволн; α — зенитный угол.

Тропосферные вариации углов прихода радиоволн могут быть оценены как

$$\sigma_{\text{фт}} = \frac{X_2}{\sqrt{\cos \alpha}}, \quad (10)$$

где $X_2 = 1 \dots 3$ угл. с. Значение $X_2 = 3$ угл. с соответствует предельным значениям флуктуаций углов прихода радиоволн.

Поскольку флуктуации углов прихода радиоволн, обусловленные тропосферными и ионосферными неоднородностями, независимы, то общие флуктуации углов можно вычислить по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{ф}}^2 = \sigma_{\text{фи}}^2 + \sigma_{\text{фт}}^2. \quad (11)$$

Зависимости среднеквадратического значения флуктуаций углов прихода радиоволн от относительной длины пути в атмосфере $\tau = 1/\cos \alpha$ для частоты $f = 1602$ МГц, рассчитанные по формулам (9)–(11), приведены на рис. 1.

Амплитуда радиоволны, проходящей через турбулентную атмосферу Земли, флуктуирует. В первом приближении [8] логарифм амплитуды

$$I = \ln \frac{E}{E_0} \quad (12)$$

распределен по нормальному закону с нулевым средним. Здесь E — амплитуда поля; E_0 — амплитуда поля при отсутствии турбулентной среды. Средний квадрат логарифма амплитуды

$$\langle I^2 \rangle = 2\pi^2 k^2 L \int_0^\infty \left[1 - \frac{k^2}{\chi^2 L} \sin \frac{\chi^2 L}{k} \right] \Phi_n(\chi) \chi d\chi, \quad (13)$$

где k — волновое число; L — расстояние, пройденное волной; $\Phi_n(\chi)$ — пространственный спектр флуктуаций показателя преломления.

В случае тропосферы выражение для численной оценки среднего квадрата логарифма амплитуды имеет следующий вид:

$$\langle I_{\text{т}}^2 \rangle = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{\lambda^2 \cos \alpha}. \quad (14)$$

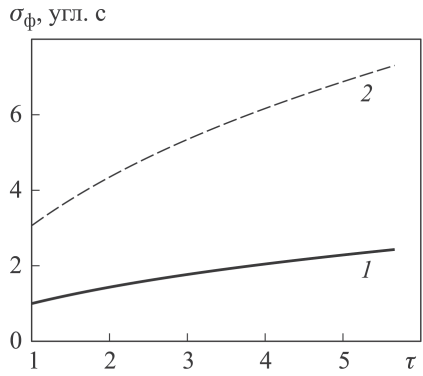


Рис. 1. Среднеквадратические значения флуктуаций углов прихода радиоволн с частотой $f = 1602$ МГц в зависимости от относительной длины пути в атмосфере $\tau = 1/\cos \alpha$: 1 — средние флуктуации; 2 — предельные флуктуации

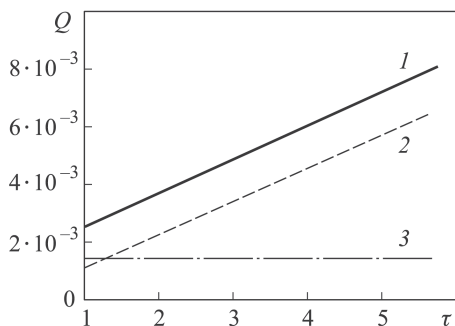


Рис. 2. Глубина замираний поля ($f = 1602$ МГц) в зависимости от относительной длины пути в атмосфере $\tau = 1/\cos \alpha$:
1, 2 — тропосферные составляющие; 3 — ионосферная составляющая

В области ионосферы для КА с высотой орбиты $h > 600$ км средний квадрат логарифма амплитуды можно оценить как

$$\langle I_{и}^2 \rangle = \frac{3,7 \cdot 10^{15}}{f^2 \sqrt{1 - \left(\frac{a}{a+h}\right)^2 \sin^2 \alpha}}, \quad (15)$$

где $a = 6400$ км — средний радиус Земли; $h = 20000$ км — высота орбиты радионавигационного КА.

Глубина замираний поля при прохождении волны через всю атмосферу Земли

$$Q = \frac{\langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2}{\langle E^2 \rangle} = e^{\langle I_{т}^2 \rangle + \langle I_{и}^2 \rangle} - 1. \quad (16)$$

Зависимости глубины замираний поля от относительной длины пути в атмосфере $\tau = \frac{1}{\cos \alpha}$ для частоты $f = 1602$ МГц, рассчитанные по формулам (14)–(16), приведены на рис. 2.

Экспериментальная оценка атмосферных флуктуаций амплитуды радионавигационного сигнала. Выражения для оценки глубины замираний (14)–(16) получены для средних значений параметров турбулентной атмосферы. Для уточнения оценки атмосферных флуктуаций амплитуды проводилась серия натурных экспериментов с использованием антенны РТ-7,5, заключающихся в сопровождении максимумом ДН антенны РТ-7,5 радионавигационных КА с записью отсчетов принимаемой мощности на жесткий диск персонального компьютера (ПК). Эксперименты проводились на фиксированной частоте $f = 1575,42$ МГц с использованием сигнала L1 GPS. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

Принятый антенной сигнал правой круговой поляризации поступает на облучатель, представляющий собой две широкополосные вибраторные антенны вертикальной и горизонтальной поляризации, сигнал с которых поступает на вход I-Q сумматора — сумматора синфазного и квадратурного сигналов. Далее, сигнал усиливается малошумящим усилителем (МШУ) и по кабелю снижения передается на вход анали-

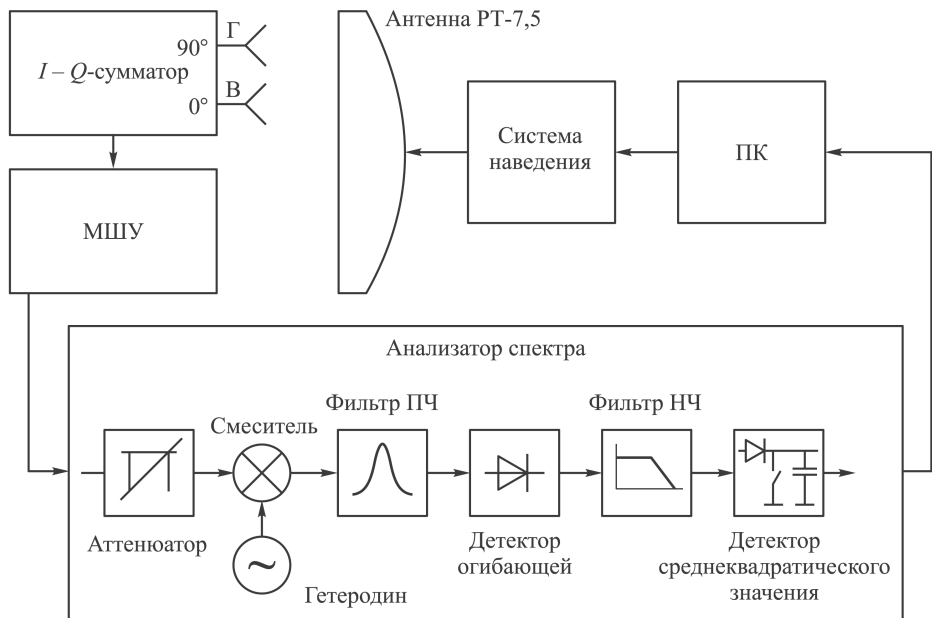


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки

затора спектра Rohde & Schwarz FSH8, работающего в режиме отображения сигнала во временной области. В этом режиме анализатор спектра работает как супергетеродинный приемник с фиксированной центральной частотой $f = 1575,42$ МГц и с заданной входной полосой $\Delta f = 3$ МГц, определяемой полосой разрешения. Отсчеты мощности сигнала после прохождения цифрового детектора среднеквадратического значения выводятся на экран анализатора спектра, содержащего 631 элемент разрешения по оси времени. Каждый кадр, содержащий 631 значение измеренной мощности на входе анализатора спектра, записывается в отдельный файл на жестком диске ПК. Длительность кадра задается временем свипирования и составляет $T_k = 63$ с; время накопления одного отсчета мощности $\Delta t = 0,1$ с.

За время проведения серии экспериментов (09.10.2014–10.12.2014) было получено 856 кадров с отсчетами мощности при сопровождении 8 КА GPS (PRN03, PRN11, PRN18, PRN19, PRN21, PRN22, PRN27 и PRN29). Из них были отобраны 814 кадров, для которых максимальная полная ошибка слежения привода антенны не превышала 60 угл. с, что эквивалентно снижению регистрируемой мощности не более, чем на 0,001 дБ при гауссовой аппроксимации главного лепестка ДН РТ-7,5, т.е. на порядок меньше, чем минимальный ожидаемый уровень глубины замираний поля Q (см. рис. 2). На рис. 4 представлены угловые положения электрической оси антенны РТ-7,5 в эксперименте. Каждая точка соответствует одному кадру данных. Черным цветом выделены кадры, для которых полная ошибка слежения привода антенны превышала 60 угл. с.

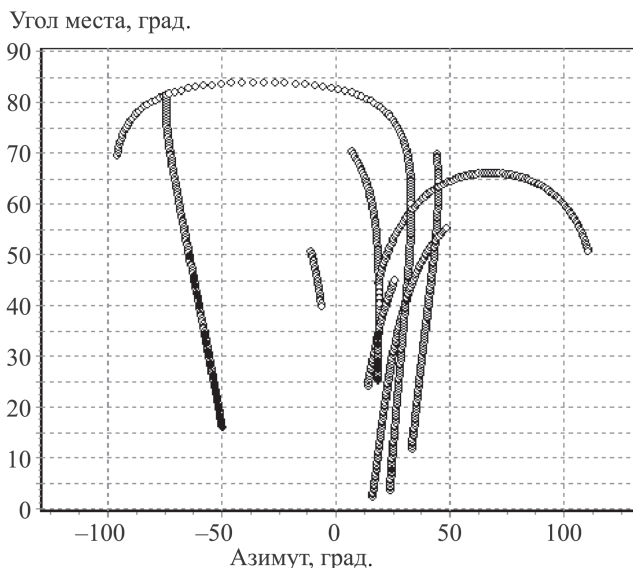


Рис. 4. Угловые положения электрической оси антенны РТ-7,5 в эксперименте для оценки атмосферных флуктуаций амплитуды сигналов радионавигационных КА

В каждом кадре данных выделялись две строки длиной $N = 180$ отсчетов. Для каждой строки рассчитывалось значение относительной флуктуации мощности

$$\delta_P = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \langle P \rangle)^2}{N \cdot \langle P \rangle}, \quad (17)$$

где P_i — отсчет мощности на выходе анализатора спектра; $\langle P \rangle$ — среднее значение мощности в строке, рассчитываемое как

$$\langle P \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i. \quad (18)$$

Относительная флуктуация мощности δ_P на выходе приемной системы, реализующей некогерентный алгоритм накопления, будет определяться как

$$\delta_P^2(T_a) = \frac{(QT_a)^2 + \Delta T^2 + \Delta T_{\text{ан}}^2}{T_a^2}, \quad (19)$$

где T_a — антенная температура, обусловленная источником; ΔT — флуктуации, вызванные тепловым шумом приемной системы; $\Delta T_{\text{ан}}$ — флуктуации, обусловленные внешней аддитивной помехой.

Упрощая выражение (19) и учитывая выражение (3), можно получить

$$\delta_P^2(q) = Q^2 + \frac{C^2}{q^2}, \quad (20)$$

где $C^2 = \frac{\Delta T^2 + \Delta T_{\text{ан}}^2}{T_c^2} \Delta f \Delta t$.

Таким образом, относительная флуктуация мощности сигнала на выходе δ_P будет определяться мультипликативной составляющей Q и аддитивной составляющей C/q .

Для оценки влияния аддитивной составляющей C/q на относительную флуктуацию мощности на выходе δ_P был проведен дополнительный натурный эксперимент с использованием антенны РТ-7,5.

Радионавигационный КА GPS PRN19 сопровождался центром ДН антенны в течение времени, равного периоду стандартного кадра $T_k = 63$ с. Затем привод антенны отключался и источник проходил через ДН антенны. Период, в течение которого антенная температура, обусловленная источником, снижалась от $T_a = T_{a\text{max}}$ до $T_a \approx 0$, разбивался на кадры длиной $T_k = 63$ с. Для каждого кадра по формуле (17) рассчитывалась относительная флуктуация мощности δ_P . Экспериментальная зависимость $\delta_P(q)$ представлена на рис. 5.

Таким образом, при отношении сигнал/шум $q > 40$ дБ можно пренебречь аддитивной составляющей флуктуации мощности C/q на выходе.

Следовательно, глубину замираний поля Q можно оценить как относительную флуктуацию мощности δ_P на выходе

$$Q \simeq \delta_P. \quad (21)$$

Экспериментальные значения относительной флуктуации мощности радионавигационного сигнала δ_P в зависимости от относительной длины пути в атмосфере $\tau = \frac{1}{\cos \alpha}$ приведены на рис. 6. Была проведена линейная аппроксимация экспериментальных значений методом наименьших квадратов для значений относительной длины пути в атмосфере $1 \leq \tau \leq 5$, что соответствует зенитным углам $0^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$.

Оценка точности амплитудной пеленгации в условиях турбулентной атмосферы. Для оценки точности амплитудной пеленгации в условиях турбулентной атмосферы было проведено моделирование алгоритма (1). Отсчеты мощности выходного сигнала ν_i находились как произведение экспериментально полученных отсчетов мощности P_i при слежении за КА и рассчитанных отсчетов нормированной ДН антенны по мощности $F(\theta_i, \alpha_i)$:

$$\nu_i = P_i F(\theta_i, \alpha_i), \quad (22)$$

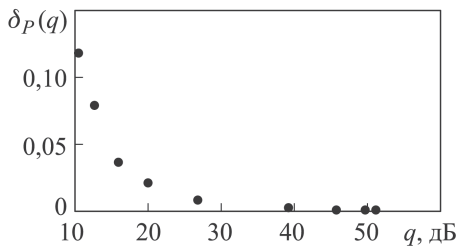


Рис. 5. Экспериментальная зависимость относительной флуктуации мощности δ_P от отношения сигнал/шум q

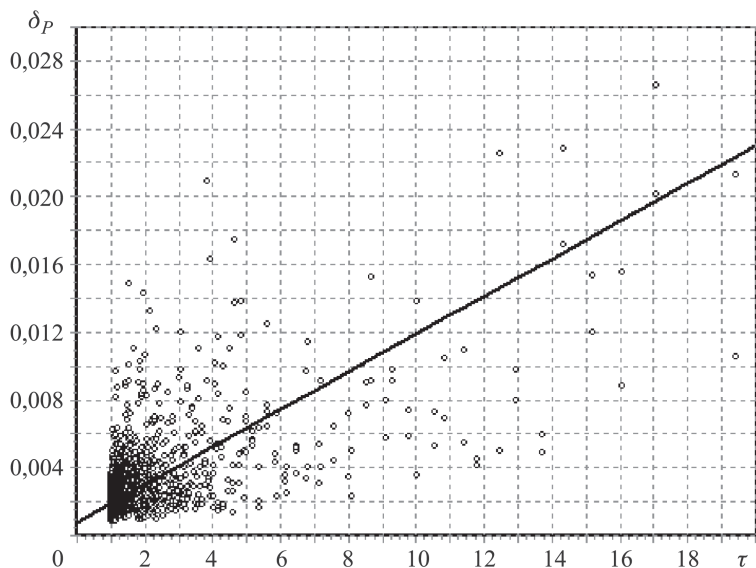


Рис. 6. Экспериментальные значения относительной флуктуации мощности радионавигационного сигнала δ_P в зависимости от относительной длины пути в атмосфере $\tau = 1/\cos \alpha$; прямая линия — линейная аппроксимация экспериментальных данных

где $\theta_i = \Delta A_i$, $\alpha_i = \Delta Z_i$ — координаты i -го отсчета от центра строки.

Нормированная ДН антенны была аппроксимирована гауссоидой с круговой симметрией

$$F(\theta, \alpha) = e^{-\frac{(\theta^2 + \alpha^2)}{w^2}}, \quad (23)$$

где w — параметр аппроксимации, $w = 0,6\theta_{0,5}$.

Затем по алгоритму (1) определялась ошибка пеленгации по одной координате $\Delta\theta_a$, обусловленная атмосферными флуктуациями амплитуды радионавигационного сигнала. Таким образом, для каждого экспериментального кадра данных было получено по два значения угловой ошибки пеленгации $\Delta\theta_a$. На рис. 7 представлены значения ошибки пеленгации по одной координате $\Delta\theta_a$ в зависимости от относительной длины пути в атмосфере $\tau = \frac{1}{\cos \alpha}$.

Видно (см. рис. 7), что среднеквадратическая ошибка пеленгации $\sqrt{\langle \Delta\theta_a^2 \rangle}$ при $\tau = \frac{1}{\cos \alpha} = 1$ примерно в 5 раз больше среднеквадратического значения флуктуаций углов прихода радиоволн σ_ϕ (см. рис. 1), а при $\tau = \frac{1}{\cos \alpha} = 5$ — примерно в 10 раз. Таким образом, можно пренебречь влиянием флуктуаций углов прихода радиоволн на полную ошибку амплитудной пеленгации по одной координате $\Delta\theta$. Следовательно,

$$\Delta\theta \simeq \Delta\theta_a. \quad (24)$$

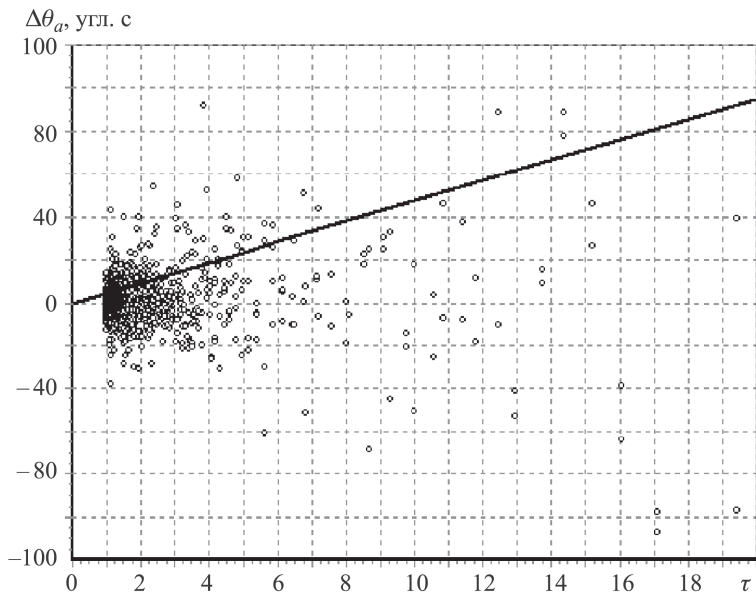


Рис. 7. Значения ошибки пеленгации по одной координате $\Delta\theta_0$ в зависимости от относительной длины пути в атмосфере $\tau = 1/\cos \alpha$; прямая линия — линейная аппроксимация среднеквадратической ошибки пеленгации $\sqrt{\langle\Delta\theta_0^2\rangle}$

Полную ошибку амплитудной пеленгации по одной координате для антенны РТ-7,5 при стандартных параметрах сканирования, можно оценить по известному значению относительной флуктуации мощности радионавигационного сигнала следующим образом:

$$\sqrt{\langle\Delta\theta^2\rangle} = 3,7 \cdot 10^3 \frac{\delta_{P0}}{\cos \alpha}, \quad (25)$$

где $\sqrt{\langle\Delta\theta^2\rangle}$ — среднеквадратическая ошибка пеленгации в угл. с при некотором значении зенитного угла α ; δ_{P0} — относительная флуктуация мощности радионавигационного сигнала при зенитном угле $\alpha = 0$.

Выводы. Полученные экспериментальные значения относительной флуктуации мощности δ_P радионавигационного сигнала близки к теоретическим значениям глубины замираний поля Q при прохождении волны через всю турбулентную атмосферу Земли.

Коэффициент усиления антенны РТ-7,5 ($G = 40$ дБ на частоте $f = 1602$ МГц) позволяет получить достаточное для задач юстировки отношение сигнал/шум $q = 50$ дБ при угловой скорости вращения ДН антенны $\nu = 400$ угл. с/с и времени накопления одного отсчета мощности $\Delta t = 0,1$ с даже с применением некогерентного алгоритма накопления сигнала.

Достигнутое отношение сигнал/шум $q = 50$ дБ позволяет пренебречь аддитивной составляющей флуктуаций мощности принятого сигнала, в которую входят и собственные тепловые шумы системы, что делает возможным напрямую оценивать текущий уровень глу-

бины замираний поля Q при распространении радионавигационного сигнала в турбулентной атмосфере Земли, посредством измерения относительной флуктуации мощности принимаемого сигнала δ_r .

В рассматриваемом диапазоне длин волн ($\lambda = 15 \dots 30$ см) наибольшее влияние на ошибку амплитудной пеленгации, и в конечном итоге на точность радиоюстировки, оказывают атмосферные флуктуации амплитуды сигнала, характеризуемые глубиной замираний поля Q . При оценке точности пеленгации можно пренебречь влиянием атмосферных флуктуаций углов прихода радиоволн σ_ϕ .

Ошибка амплитудной пеленгации по одной координате по результатам моделирования на основе данных эксперимента с использованием антенны РТ-7,5 при зенитных углах $\alpha = 0 \dots 85^\circ$ и объеме выборки 1628 составила $|\Delta\theta| \leq 20$ угл. с с доверительной вероятностью 0,95.

Угловая ошибка наведения электрической оси антенны РТ-7,5, определяемая среднеквадратической ошибкой пеленгации по сигналам радионавигационных КА в условиях турбулентной атмосферы для зенитных углов $\alpha = 0 \dots 80^\circ$, может быть оценена как $\sqrt{\langle \Delta\theta^2 \rangle} = \frac{X_3}{\cos \alpha}$, где $X_3 = 5 \dots 15$ угл. с; $X_3 = 5$ угл. с — значение среднеквадратической ошибки пеленгации при зенитном угле $\alpha = 0^\circ$, соответствующее средним значениям наблюдаемой в эксперименте относительной флуктуации мощности; $X_3 = 15$ угл. с — соответствующее максимальным значениям относительной флуктуации мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Парицков А.А., Михайлицкий В.П., Соловьев Г.Н.* Радиотелескоп РТ-7,5 МГТУ вчера, сегодня, завтра // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2009. Спец. вып. “Радиолокация, спутниковая навигация и связь, радиоастрономия”. С. 176–186.
2. *Власов И.Б., Михайлицкий В.П., Гаврилов А.И., Рыжов В.С.* Результаты наблюдения сигналов спутниковых систем с помощью антенны радиотелескопа РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. Спец. вып. № 7 “Радиооптические технологии в приборостроении”. С. 182–190.
3. *Власов И.Б., Михайлицкий В.П., Рыжов В.С.* Калибровка радиотракта радиотелескопа РТ-7,5 при мониторинге сигналов навигационных космических аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2014. № 6.
4. *Теоретические основы радиолокации* / под ред. В.Е. Дулевича. М.: Сов. радио, 1964. 732 с.
5. *Сосулин Ю.Г.* Теоретические основы радиолокации и радионавигации. М.: Радио и связь, 1992. 304 с.
6. *ГЛОНАСС.* Интерфейсный контрольный документ. Навигационный сигнал в диапазонах L1, L2. Редакция 5.1. 2008 г.
7. *Томпсон А.Р., Моран Д.М., Свенсон Д.У.* Интерферометрия и синтез в радиоастрономии / пер. с англ. под ред. Л.И. Матвеевко. М.: Физматлит, 2003. 624 с.
8. *Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И.* Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969. 155 с.

REFERENCES

- [1] Parshchikov A.A., Mikhaylitskiy V.P., Solov'ev G.N. The BMSTU Radio Telescope RT-7.5 Yesterday, Today, Tomorrow. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr., Spetsvyp "Radiolokatsiya, sputnikovaya navigatsiya i svyaz', radioastronomiya"* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng., Spec. Issue Radiolocation, Satellite Navigation and Communications, Radio Astronomy], 2009, pp. 176–186 (in Russ.).
- [2] Vlasov I.B., Mikhaylitskiy V.P., Gavrilov A.I., Ryzhov V.S. The Results of the Observation of Satellite System Signals Using the Antenna of the BMSTU Radio Telescope RT-7.5. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr., Spetsvyp no. 7. Radioopticheskie tekhnologii v priborostroenii* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng., Spec. Issue no. 7. Radio Optical Technologies in Instrument Engineering], 2012, pp. 182–190 (in Russ.).
- [3] Vlasov I.B., Mikhaylitskiy V.P., Ryzhov V.S. Radio Road Calibration of Radio Telescope RT-7.5 During Signal Monitoring of Navigational Spacecraft. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2014, no. 6, pp. 96–107 (in Russ.).
- [4] Dulevich V.E., ed. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii* [Principal Theory of Radio Location]. Moscow, Sov. radio Publ., 1964. 732 p.
- [5] Sosulin Yu.G. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii i radionavigatsii* [Principal Theory of Radio Location and Radio Navigation]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1992. 304 p.
- [6] GLONASS. *Interfeysnyy kontrol'nyy dokument. Navigatsionnyy signal v diapazonakh L1, L2* [The Interface Control Document. The Navigation Signal in the L1, L2 Ranges]. Amendment 5.1. 2008.
- [7] Thompson A.R., Moran J.M., Swenson G.W. *Interferometry and synthesis in radio astronomy*. S.L., 2003.
- [8] Kolosov M.A., Armand N.A., Yakovlev O.I. *Rasprostranenie radiovoln pri kosmicheskoy svyazi* [Radio Wave Propagation in Space Communications]. Moscow, Svyaz' Publ., 1969. 155 p.

Статья поступила в редакцию 24.07.2015

Власов Игорь Борисович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана, начальник отдела НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Vlasov I.B. — D.Sc. (Eng.), Professor of Engineering, Department of Radio Electronic Systems and Devices, Head of Department, Research Institute of Radioelectronic Technology, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Рыжов Владимир Сергеевич — инженер кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ryzhov V.S. — engineer, Department of Radio Electronic Systems and Devices, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Власов И.Б., Рыжов В.С. Оценка достижимой точности юстировки антенны радиотелескопа РТ-7,5 методом амплитудной пеленгации по сигналам радионавигационных космических аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 4. С. 66–79.

Please cite this article in English as:

Vlasov I.B., Ryzhov V.S. The attainable accuracy of the RT-7.5 radio telescope antenna alignment using the navigation satellites. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2015, no. 4, pp. 66–79.

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет книга
МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
ИЗДЕЛИЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**



Определены количественные показатели остаточного ресурса и установлены их точечные, доверительные и гарантированные оценки. Исследована достижимость гарантированных непараметрических оценок, найдены их коэффициенты смещения. Получены асимптотические и предельные оценки показателей остаточного ресурса, доказаны их экстраполяционные и интерполяционные оценки. С использованием физических моделей расходования ресурса изделий радиоэлектроники получены формулы для расчета и оценки показателей ресурса в штатном режиме эксплуатации через показатели для форсированного режима. Приведены примеры схемной избыточно-

сти радиоэлектронной аппаратуры в качестве источника увеличения ресурса.

Для научных работников. Может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам старших курсов технических вузов, а также специалистам в области надежности радиоэлектронной аппаратуры.