

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.96 (031)

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-5-50-65>

Качество радиолокационной пеленгации при коническом сканировании

А. Д. Плужников[✉], Л. В. Когтева, Е. Н. Приблудова, С. Б. Сидоров, Е. Г. Чужайкин

Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

✉ pluzhnikov@nntu.ru

Аннотация

Введение. Коническое сканирование находит применение при экономии аппаратных ресурсов в новой технике и используется во многих системах, модернизация которых проводится в настоящее время. Все это сохраняет актуальность исследований данного средства пеленгации.

Цель работы. Коррекция известных расчетных соотношений для дисперсии результатов пеленгации – показателя качества (точности) пеленгации, точнее, дополнение этих соотношений другими, а также определение при этом возможностей оптимизации систем пеленгации и автосопровождения объектов.

Материалы и методы. Рассмотрение факторов, ограничивающих точность пеленгации при коническом сканировании, реализуется в статье применением подхода на основе спектрального анализа. Математическое моделирование со статистической обработкой количественных результатов позволяет определить условия, при которых влияние определенных факторов оказывается преобладающим, а также условия, при которых требуется коррекция (дополнение) известных расчетных соотношений. Указанные условия представляют собой значения ошибок, при которых сопровождаются пеленгуемые объекты. Новые расчетные соотношения для упомянутой коррекции определяются методами статистической радиотехники.

Результаты. Справедливость найденных расчетных соотношений подтверждается математическим моделированием. Расчеты и моделирование приводят к необходимости оптимизации параметров для систем автосопровождения объектов.

Заключение. Проведенное исследование показывает, что при выборе параметров для систем автосопровождения с коническим сканированием целесообразно стремиться к реализации сопровождения объектов не с минимальными, а с оптимизированными ошибками сопровождения по угловым координатам, подлежащими оцениванию при пеленгации. Причем оптимизированные ошибки (значения статических ошибок и наиболее вероятные значения динамических ошибок сопровождения) оказываются такими, при которых требуется коррекция известных аналитических оценок для дисперсии результатов пеленгации – качественного показателя пеленгатора (показателя точности). Найденные аналитические соотношения позволяют выполнить такую коррекцию, что может увеличить оценку дисперсии на 10 дБ.

Ключевые слова: радиолокация, пеленгация, коническое сканирование, обработка сигналов, ошибки сопровождения, дисперсия результатов, отношение сигнал–помеха

Для цитирования: Качество радиолокационной пеленгации при коническом сканировании / А. Д. Плужников, Л. В. Когтева, Е. Н. Приблудова, С. Б. Сидоров, Е. Г. Чужайкин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 5. С. 50–65. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-5-50-65

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.06.2021; принята к публикации после рецензирования 05.07.2021; опубликована онлайн 29.11.2021



Quality of Radar Direction-Finding via Conical Scanning

Anatoly D. Pluzhnikov✉, Lyudmila V. Kogteva, Elena N. Pribludova,
Sergey B. Sidorov, Evgeny G. Chuzhaykin

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

✉ pluzhnikov@nntu.ru

Abstract

Introduction. Conical scanning is applied for optimizing hardware resources in new devices, as well as when upgrading existing systems. All this explains the relevance of studying this type of direction finding systems.

Aim. To adjust and complement the known calculation relations for the variance of direction finding results – an indicator of the quality (accuracy) of direction finding, as well as to determine the possibilities of optimizing direction finding and automatic object tracking processes.

Materials and methods. Factors limiting the accuracy of direction finding via conical scanning were analyzed using spectral analysis. Mathematical modeling followed by statistical processing of quantitative results makes it possible to determine the conditions under which the influence of certain factors is predominant, as well as the conditions under which adjustment (completion) of the known calculation relations is required. The specified conditions are the errors at which the objects of direction finding are tracked. New calculation relations for the mentioned adjustment were determined by the methods of statistical radio engineering.

Results. The validity of the calculation relations found is confirmed by mathematical modeling. Calculations and modeling lead to the need to optimize parameters for automatic object tracking systems.

Conclusion. The study shows that, when choosing parameters for auto-tracking systems with conical scanning, it is important to implement object tracking not with minimal, but rather with optimized tracking errors in angular coordinates, which are to be estimated during direction finding. Moreover, the optimized errors (the values of static errors and the most probable values of the dynamic tracking errors) will require adjustment of the known analytical estimates for the variance of the direction finding results – the qualitative indicator of the direction finder (accuracy indicator). The determined analytical relationships allow such an adjustment to be performed, leading to an increased variance estimate by 10 dB.

Keywords: radar location, direction finding, conical scanning, signal processing, tracking errors, result variance, signal-to-interference ratio

For citation: Pluzhnikov A. D., Kogteva L. V., Pribludova E. N., Sidorov S. B., Chuzhaykin E. G. Quality of Radar Direction-Finding via Conical Scanning. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 5, pp. 50–65. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-5-50-65

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 04.06.2021; accepted 05.07.2021; published online 29.11.2021

Введение и общая формулировка задачи. Для радиолокационного сопровождения объектов по угловым координатам в настоящее время предпочтительным принято считать применение многоканальных (моноимпульсных) пеленгаторов, обладающих хорошо известными преимуществами [1, 2]. Наряду с этим в современных литературных источниках [1–5] отмечается, что в определенных конкретных ситуациях эффективным оказывается применение конического скани-

рования во вновь создаваемой технике для решения задач радиолокационной пеленгации [2], например для решения подобных задач малогабаритными локаторами [1] при экономии аппаратных ресурсов [3, 4]. Кроме того, сейчас интенсивно проводятся работы по модернизации ранее созданных систем [6–8], использующих коническое сканирование. К тому же сканирование по угловым координатам (следовательно, коническое сканирование тоже) можно использовать в каче-

стве средства повышения помехоустойчивости активных локаторов [9–11]. В связи с вышеизложенным вопросы аналитической оценки характеристик радиолокационной пеленгации при коническом сканировании, а также выбора параметров для систем с коническим сканированием являются востребованными в настоящее время. Результаты исследования подобных вопросов содержатся в [1–5, 12–16]. Они появились сравнительно давно вместе с развитием практического применения конического сканирования и продолжают появляться в настоящее время. Как будет показано далее, некоторые известные результаты требуют существенного уточнения. Это подтверждается и появившимися в последние годы публикациями по данной теме [3–5]. Очевидно, что и без ссылок на давние публикации [13, 15] в данном случае не обойтись (как и в других современных публикациях по данной тематике, например, в [4]).

Конкретизация сформулированной задачи.

Решение задач пеленгации будем рассматривать применительно к воздушным объектам (летательным аппаратам), среди которых можно выделить цели и наводимые на них управляемые снаряды – ракеты. При этом принимаемые радиолокационным пеленгатором полезные сигналы называем переизлученными сигналами. Они могут представлять собой сигналы, рассеянные целью, или сигналы, излученные ответчиком ракеты.

Как известно [1, 2], при коническом сканировании информация об угловых координатах пеленгуемого объекта извлекается из принимаемых (переизлученных объектом) сигналов на основе анализа закона амплитудной модуляции. Поэтому наиболее существенным фактором, ограничивающим качество радиолокационной пеленгации в рассматриваемом случае, являются амплитудные флюктуации сигналов, переизлучаемых объектами пеленгации. Варианты аналитических оценок для влияния указанных флюктуаций на качество пеленгации при коническом сканировании приведены в [2] и в других литературных источниках, например в [13, 15]. Причем известные варианты оценок приводят к заключению о том, что качество пеленгации (дисперсия результатов пеленгации) определяется значением энергетического спектра амплитудных флюктуаций в окрестности частоты, равной частоте конического сканирования и существенно превышающей ширину спектра, сосредоточенного вблизи нулевой ча-

стоты, т. е. указанное значение оказывается сравнительно малым. Однако приводимые далее результаты исследований показывают, что такие оценки справедливы лишь для определенных условий, не обязательно соответствующих рациональному выбору параметров пеленгатора (и систем автосопровождения объектов по угловым координатам), а при оптимизации упомянутых параметров оказываются лучше действительных показателей, т. е. требуют коррекции.

По указанным причинам необходимо провести тщательный анализ влияния амплитудных флюктуаций на качество пеленгации при коническом сканировании, рассмотреть вопросы рационального выбора (оптимизации) параметров систем и найти соотношения для коррекции известных оценок соответствующих показателей качества. При этом влияние внутренних шумов приемных устройств не рассматриваем, как и в [13]. Кроме того, не учитываем поляризационные погрешности, исследуемые в [4].

Обработка сигналов и их спектральный состав. При импульсном радиолокационном зондировании и коническом сканировании закон амплитудной модуляции, анализируемый, как отмечалось, для извлечения информации об угловых координатах пеленгуемого объекта, представляет собой закон изменения (в зависимости от времени) амплитуд принимаемых радиоимпульсов, т. е. может быть определен как сигнал, формируемый в радиолокационном приемнике посредством амплитудного и последующего пикового детектирования. Строго говоря (если не учитывать поначалу упоминавшиеся флюктуации), такой сигнал $U_r(t)$ описывается достаточно сложной периодической функцией с периодом, равным периоду конического сканирования T_{sc} . В [3, 4] учитываются первые три члена при разложении данного сигнала в ряд Фурье. Однако на практике при сопровождении объектов с достаточно малыми угловыми ошибками зачастую (в частности, для решения поставленной задачи, как мы подтверждаем математическим моделированием) оказывается возможным ограничиться первыми двумя членами разложения данного сигнала и записать указанный сигнал в виде (см., например, [14])

$$\begin{aligned} U_r(t) &= U_{r0} [1 + M \cos(\Omega t - \varphi)] = \\ &= U_{r0} + u_{es}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где t – текущее время; $U_{r0} = \text{const}$ – постоянная составляющая записанного сигнала (первый из двух членов, которыми ограничиваемся при разложении в ряд Фурье); коэффициент (глубина) модуляции

$$0 < M < 1 \quad (2)$$

пропорционален [16] модулю угловой ошибки сопровождения Δ , иначе говоря, пропорционален взаимному угловому смещению равносигнального направления [16] и линии визирования – направления на сопровождаемый объект (напомним, что рассматривается случай сопровождения объекта с достаточно малыми угловыми ошибками, т. е. при достаточно малых значениях положительной величины Δ , когда M , конечно, оказывается существенно меньше единицы); $\Omega = 2\pi/T_{sc}$ – частота (круговая) конического сканирования, рад/с; φ – начальная фаза, соответствующая направлению отклонения линии визирования от равносигнального направления, что можно назвать аргументом ошибки сопровождения; первую гармонику в (1), т. е. второй из двух членов, которыми ограничиваемся при разложении в ряд Фурье:

$$u_{es}(t) = U_{r\Omega} \cos(\Omega t - \varphi), \quad (3)$$

называют сигналом ошибки, амплитуда которого

$$U_{r\Omega} = MU_{r0} \quad (4)$$

пропорциональна коэффициенту модуляции M и, следовательно, модулю угловой ошибки сопровождения Δ .

Введем обозначения: f_0 – соответствующее равносигнальному направлению значение конически сканирующей трехмерной диаграммы направленности (ДН), которая предполагается симметричной относительно своей оси; f_0' – модуль найденной для указанного направления производной от такой функции, которая является сечением упомянутой трехмерной ДН плоскостью, содержащей ось симметрии и равносигнальное направление (далее при анализе количественных результатов и представлении ДН как функции от нормированного угла приводится формула для определения такой производной). Тогда нетрудно показать, что при сделанном допущении о достаточно малых значениях Δ

$$U_{r0} = \mu_1 f_0, \quad (5)$$

$$U_{r\Omega} = MU_{r0} = \mu_1 f_0' \Delta. \quad (6)$$

В (5) и (6) μ_1 – действительный коэффициент, пропорциональный амплитуде переизлученного сопровождаемым объектом сигнала и коэффициенту передачи приемного устройства с детекторами (амплитудным и пиковым). Причем в случае пеленгации и сопровождения целей по рассеиваемым ими сигналам, реализации конического сканирования в режимах излучения и приема рассматриваются так называемые [15] двусторонние ДН, а в случае пеленгации и сопровождения управляемых снарядов (ракет) по излучаемым ответчиками сигналам, а также при скрытом коническом сканировании – односторонние ДН [15], т. е. конически сканирующие приемные ДН.

Заметим, что (1) и (3) соответствуют тому случаю, когда угловое смещение цели φ на так называемой картинной плоскости [1], перпендикулярной равносигнальному направлению, наблюдаемой со стороны локатора и показанной на рис. 1, отсчитывается от оси α в направлении сканирования, например, против часовой стрелки, как это показано на упомянутом рисунке. На рис. 1 α и β – угловые координаты с положительными и отрицательными значениями в двух ортогональных плоскостях сферической системы координат, центром (началом) которой является точка размещения радиолокационного пеленгатора. Обычно угол β отсчитывается в вертикальной, т. е. угломестной плоскости. На картинной плоскости (плоскости рис. 1) α и β представляются линейными координатами в декартовой системе [1] благодаря малости реальных значений этих двух величин. Начало координат данной декартовой си-

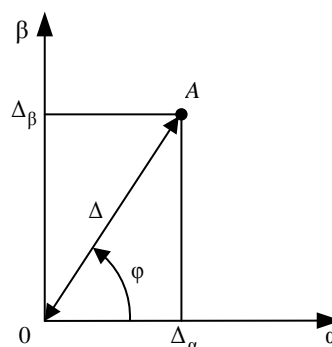


Рис. 1. Параметры ошибок сопровождения

Fig. 1. Tracking error parameters

стемы соответствует равносигнальному направлению, а точка A на картинной плоскости соответствует линии визирования (направлению на пеленгуемый и сопровождаемый объект). Кроме того, на рассматриваемой плоскости (рис. 1) показана соответствующая графическая интерпретация обозначения Δ , определенного ранее. Здесь же показаны ошибки сопровождения Δ_α и Δ_β объекта по углам α и β – ортогональные составляющие модуля угловой ошибки сопровождения Δ :

$$\Delta_\alpha = \Delta \cos \varphi, \quad (7)$$

$$\Delta_\beta = \Delta \sin \varphi. \quad (8)$$

Данные ошибки подлежат определению при пеленгации и сопровождении объекта, т. е. они являются результатами пеленгации объекта, так как определяют его угловые координаты при известном равносигнальном направлении (совмещение равносигнального направления с направлением на сопровождаемый объект, т. е. минимизация ошибок сопровождения Δ_α и Δ_β , в принципе не обязательно: главное – определить указанные ошибки с требуемой точностью). При этом информация о равносигнальном направлении может поступать либо от датчиков положения антенны (при механическом сопровождении объекта по направлению), либо от элементов электронного управления конически сканирующим лучом. Итак, для пеленгации объекта требуется найти ошибки сопровождения (7) и (8). Последнее может быть реализовано посредством обработки сигнала ошибки (3) в двух параллельных квадратурных каналах (рис. 2), каждый из которых представляет собой фазовый (синхронный) детектор, т. е. каскадно соединенные перемножитель и фильтр нижних частот (ФНЧ), который может быть элементом следящей системы [15, 16]. Учитывая функциональную схему (рис. 2), обозначенные на ней выходные величины, (3), (6)–(8) и полагая, что ФНЧ не пропускает колебания с частотой 2Ω , найдем пеленгационные характеристики (как говорилось, для достаточно малых значений Δ , когда формируются линейные участки этих характеристик) $u_{e\alpha}(\Delta_\alpha)$ и $u_{e\beta}(\Delta_\beta)$:

$$u_{e\alpha} = \mu_2 \Delta_\alpha, \quad (9)$$

$$u_{e\beta} = \mu_2 \Delta_\beta, \quad (10)$$

причем содержащийся в (9) и (10) действительный коэффициент

$$\mu_2 = \mu_1 \mu_3 f_0' / 2, \quad (11)$$

где μ_3 – коэффициент передачи ФНЧ вблизи нулевой частоты. Таким образом, (11) определяет крутизну линейного участка пеленгационных характеристик.

Для последующих рассуждений полезно заметить следующее. На схему (рис. 2) действует сигнал ошибки $u_{es}(t)$, который определяется формулой (3), т. е. имеет частоту Ω . Каждый из двух перемножителей переносит спектр сигнала с указанной частоты Ω на нулевую частоту и на частоту 2Ω . ФНЧ выделяет только результат переноса спектра на нулевую частоту и режектирует результат переноса на частоту 2Ω . Такая обработка сигнала рассматриваемой схемой эквивалентна фильтрации того же сигнала полосовым фильтром, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) которого получается при смещении АЧХ ФНЧ с нулевой частоты на частоту Ω и дополнении соответствующим зеркальным отображением относительно частоты Ω (все АЧХ предполагаем представленными в области положительных частот). Изложенное поясняет рис. 3, на котором сплошная кривая $K_{f0}(\omega)$ представляет АЧХ ФНЧ; штриховая – АЧХ $K_f(\omega)$ эквивалентного полосового фильтра; ω – круговая частота, рад/с; Δ_f – ширина полосы пропускания ФНЧ, Гц (в дальнейшем для получения количественных результатов определяем Δ_f на уровне половины от максимума АЧХ). Полагая обработку сигнала ошибки $u_{es}(t)$ эквивалентным полосовым фильтром (на практике сигнал ошибки зачастую выде-

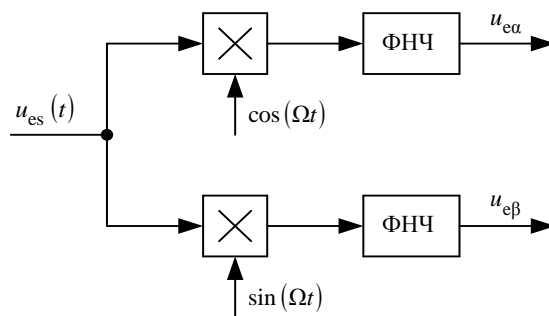


Рис. 2. Схема обработки сигналов

Fig. 2. Signal processing circuit

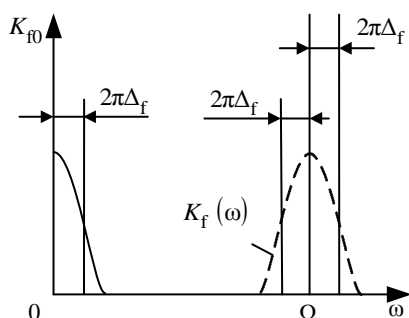


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики фильтров

Fig. 3. Filter skirts

ляется реальным полосовым фильтром и лишь после этого подвергается обработке в квадратурных каналах), рассмотрим эту обработку в спектральной области.

Напомним, что амплитуда переизлученного сопровождаемым объектом сигнала на практике является флюктуирующей. Энергетический спектр $N_{ГГ}(\omega)$ этих амплитудных флюктуаций (закон изменения амплитуд переизлученных радиоимпульсов) представлен на рис. 4, а, хотя форма спектра может отличаться, как, например, в [13]. Дискретная часть этого спектра (спектральная составляющая на частоте $\omega = 0$) определяется средним значением (математическим ожиданием) флюктуирующей амплитуды и может рассматриваться как полезный сигнал, преобразуемый радиолокационным пеленгатором в сигнал ошибки. Непрерывная часть данного энергетического спектра, имеющая ширину Δ_f [Гц], определяется случайными отклонениями флюктуирующей амплитуды от ее среднего значения и может рассматриваться как аддитивная помеха (в дальнейшем для получения количественных результатов определяем Δ_f на уровне половины от максимума спектра).

Вследствие конического сканирования происходит упомянутое ранее преобразование радиолокационным пеленгатором указанного полезного сигнала в сигнал, который описан (1)–(4), т. е. имеет дискретный спектр $S_u(\omega)$ в виде двух спектральных линий – сплошных линий на рис. 4, б. Причем эквивалентный (или реальный; см. ранее) полосовой фильтр с АЧХ $K_f(\omega)$ должен выделить одну из этих двух спектральных линий – гармонику с частотой Ω , которая представляет собой сигнал ошибки, определяемый (3), (4)

и несущий информацию об искомых ошибках сопровождения.

Аналогично (тоже вследствие конического сканирования) мешающие амплитудные флюктуации переизлученного сигнала преобразуются в помеху, которая маскирует сигнал ошибки и имеет энергетический спектр $N_{ab}(\omega)$, показанный на рис. 4, в двумя сплошными линиями $N_a(\omega)$ и $N_b(\omega)$:

$$N_{ab}(\omega) = N_a(\omega) + N_b(\omega),$$

причем $N_a(\omega)$ и правая половина симметричной (относительно $\omega = \Omega$) функции $N_b(\omega)$ повторяют форму непрерывной части спектра $N_{ГГ}(\omega)$ (рис. 4, а и в). Иначе говоря, имеет место взаимная пропорциональность двух функций: $N_{ГГ}(\omega)$ и $N_a(\omega)$. Кроме того, с учетом (4), рис. 4, б и упомянутой аналогии можно записать следующее соотношение для параметров функций $N_a(\omega)$ и $N_b(\omega)$ – для соответствующих максимумов спектра:

$$N_{b\Omega} \approx M^2 N_{a0} \quad (12)$$

(приближенный характер равенства связан, в частности, с тем, что $N_{b\Omega} \neq 0$ при $\Delta = 0$ и $M = 0$).

Таким образом, можно сказать, что сигнал ошибки действует на фоне двух составляющих помехи: одна из них имеет спектр $N_a(\omega)$ в окрестности нулевой частоты, т. е. является низкочастотной, а другую можно назвать относительно высокочастотной, так как она имеет спектр $N_b(\omega)$ в окрестности частоты Ω .

Общие соображения относительно влияния низкочастотной и высокочастотной спектральных составляющих на качество пеленгации, вопроса о коррекции известных оценок. Как уже упоминалось, известные оценки влияния амплитудных флюктуаций определяются значением $N_{ГГ}(\Omega)$ энергетического спектра $N_{ГГ}(\omega)$ амплитудных флюктуаций. Эти известные оценки [2, 13, 15] и введенные обозначения позволяют записать формулу для дисперсии, определяемой пеленгатором ошибки сопровождения Δ_α при $\Delta_\beta = 0$:

$$\sigma_\alpha^2 = \Delta_f N_{ГГ}(\Omega) / \mu, \quad (13)$$

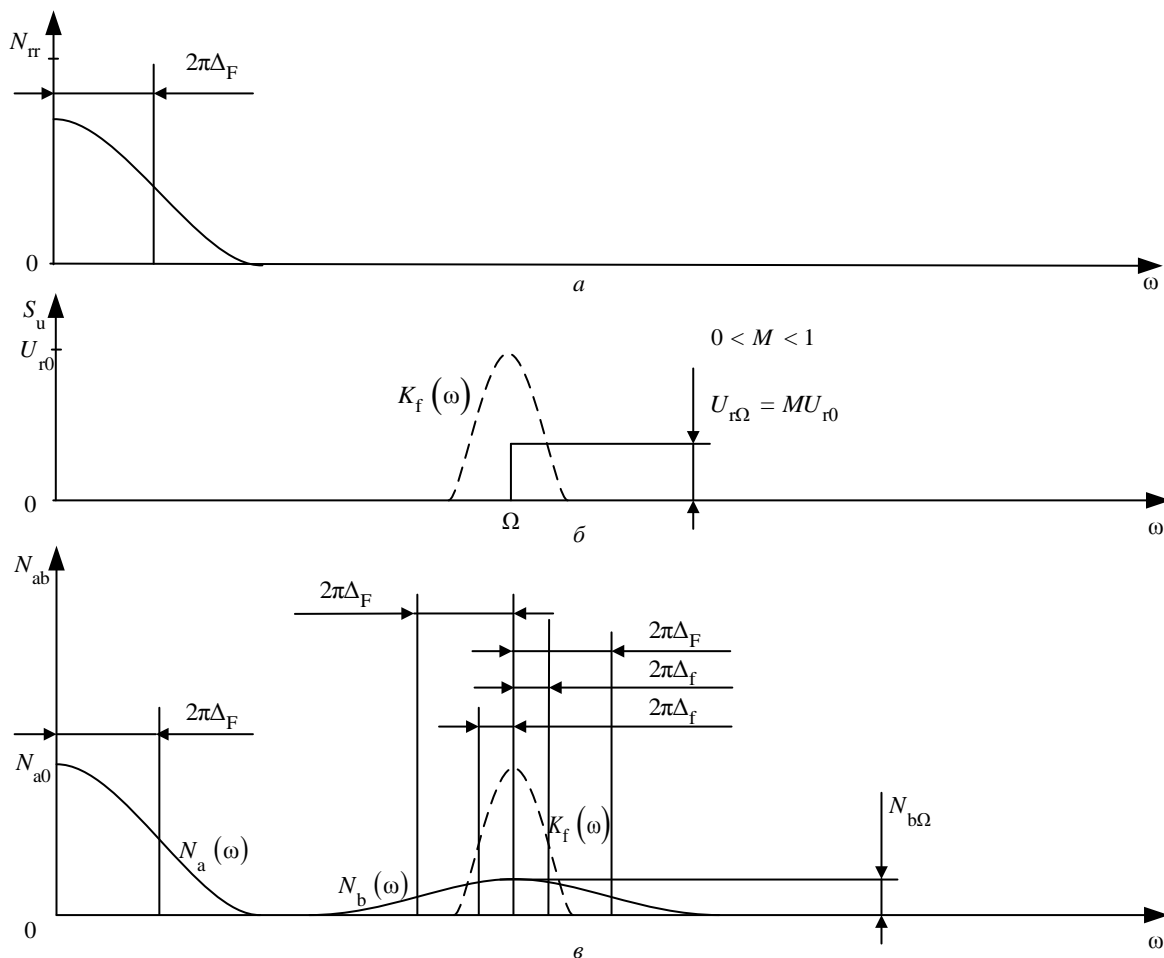


Рис. 4. Спектры сигналов и помех: *a* – энергетический спектр амплитудных флюктуаций; *б* – спектр полезного сигнала; *в* – энергетический спектр помехи

Fig. 4. Signal and interference spectrums: *a* – power spectrum of amplitude fluctuations; *б* – useful signal spectrum; *в* – power spectrum of interference

где μ – коэффициент, связанный с параметрами антенной системы и имеющий такую размерность, которая зависит от выбора единиц измерения угловых координат. Конкретизация связи данного коэффициента с параметрами антенной системы проводится в [2, 13, 15].

Согласно отмеченной взаимной пропорциональности функций $N_{\Gamma}(\omega)$ и $N_a(\omega)$, а также используемым обозначениям известное соотношение (13) эквивалентно формуле

$$\sigma_a^2 = \Delta_f N_a(\Omega) / \mu_2^2.$$

Это означает, что известные оценки для дисперсии определяемой пеленгатором ошибки сопровождения учитывают влияние только низкочастотной составляющей $N_a(\omega)$ спектра $N_{ab}(\omega)$ помехи. Очевидно, что такое оценивание дисперсии можно считать оправданным, если влиянием

высокочастотной составляющей со спектром $N_b(\omega)$ можно пренебречь по причине (12) и малых значений M (малых значений Δ). Наиболее четко допущение о "незначительных" значениях Δ при получении указанных оценок формулируется в [13]. Однако вопросы относительно правомерности указанного допущения и, следовательно, влияния низко- и высокочастотных спектральных составляющих на качество пеленгации, на наш взгляд, остаются.

Действительно, низкочастотная составляющая со спектром $N_a(\omega)$, конечно, является более интенсивной согласно рис. 4 и (2), (12), но в полосе пропускания фильтра с АЧХ $K_f(\omega)$ попадает только слабый "хвост" спектра $N_a(\omega)$, т. е. значение $N_a(\Omega)$ в последней формуле может оказаться достаточно малым, а область интенсивных

значений спектра $N_a(\omega)$ соответствует лишь малому уровню "хвоста" АЧХ $K_f(\omega)$. Кроме того, имеется очевидная возможность ослабить влияние данной составляющей помехи посредством выбора достаточно большого значения Ω (разумеется, при выполнении такого условия [16], когда частота конического сканирования остается в несколько раз меньше частоты повторения зондирующих импульсов локатора) и достаточно малого значения Δ_f . Однако игнорировать влияние низкочастотной составляющей было бы ошибкой, так как полное ее подавление фильтром с АЧХ $K_f(\omega)$, строго говоря, невозможно, т. е. реальное значение $N_a(\Omega)$ не является нулевым.

С другой же стороны, высокочастотная составляющая помехи, имеющая спектр $N_b(\omega)$ в окрестности частоты Ω сигнала ошибки – частоты настройки выделяющего этот сигнал фильтра с АЧХ $K_f(\omega)$, как уже отмечалось, является менее мощной, причем мощность данной составляющей уменьшается по мере уменьшения ошибки, с которой объект сопровождается по угловым координатам.

Приведенные качественные рассуждения подтверждают то, что влияние двух составляющих на характеристики пеленгатора, а также вопрос о значениях угловых ошибок сопровождения и, значит, о необходимости коррекции известных количественных оценок требуют изучения. Далее это изучение осуществляется посредством анализа количественных результатов, получаемых математическим моделированием и расчетами по найденным аналитическим соотношениям. Далеко не всегда получаются такие результаты, которые подтверждали бы упомянутые широко известные аналитические оценки.

Основные допущения для количественного анализа. Для конически сканирующей 3-мерной ДН используем гауссовскую аппроксимацию ее сечения в плоскости, содержащей ось симметрии этой ДН (такое же допущение в [3] и [4] называют двумерной гауссовской аппроксимацией). Для амплитудных флуктуаций применяем экспоненциальную аппроксимацию автокорреляционной функции с заданным интервалом корреляции τ , а также гауссовскую аппроксимацию плотности вероятностей при усечении со стороны отрицательных значений и достаточно малом (в соответствии

с [2]) отношении σ/m среднеквадратичного отклонения σ флуктуаций к среднему значению (математическому ожиданию) m амплитуды переизлученного сопровождаемым объектом сигнала. Указанный выбор аппроксимации для автокорреляционной функции и плотности вероятности сделан для определенности, без которой невозможен количественный анализ, и обусловлен разнообразием [2, 13] названных характеристик в реальности, а также недостаточной их изученностью. Так, в [3] и [4] по этому поводу просто делается допущение о том, что $\tau \gg T_{sc}$.

Количественный анализ влияния низкочастотной и высокочастотной спектральных составляющих на качество пеленгации. Та часть количественного анализа, которая позволяет сравнить влияние низко- и высокочастотных спектральных составляющих на качество пеленгации, реализована методом математического моделирования вышеописанной обработки сигналов с флуктуирующей амплитудой при вычислении дисперсий σ_α^2 и σ_β^2 для результатов пеленгации (результатов оценивания ошибок сопровождения Δ_α и Δ_β схемой на рис. 2) в плоскостях отсчета углов α и β соответственно. Далее приводятся результаты моделирования, выполненного при следующих условиях: для вычисления выбрана дисперсия σ_α^2 при $\Delta_\beta = 0$; $T_{sc}/T_s = 10$, где T_s – период повторения зондирующих импульсов локатора; $\Delta_p/\theta = 0.5$, где Δ_p – угол между равносигнальным направлением и осью симметрии конически сканирующей 3-мерной ДН, имеющей ширину θ на уровне -3 дБ; схема (см. рис. 2) моделируется при реализации в ней цифровой обработки отсчетов сигнала, сформированных при интервале дискретизации T_s и имеющих амплитуду принимаемых пеленгатором импульсов, когда ФНЧ представляет собой цифровой рекурсивный фильтр заданного порядка N_f , а точнее, каскадное соединение одинаковых звеньев – рекурсивных фильтров 1-го порядка, количество которых равно N_f ; $N_f = 4$; $K = 100$ – количество экспериментов, реализуемых для формирования случайных значений $u_{e\alpha}$ и оценивания их дисперсии σ_α^2 ; $\sigma/m = 0.1$; $\tau = 66T_s$. Можно показать, что сде-

ланый нами выбор соотношения $\tau = 66T_s$ при реальном [2] значении ширины энергетического спектра $\Delta_F = 10$ Гц соответствует дальности действия лоатора, равной 36 км и менее (в случае выбора T_s , исходя из условия однозначного определения дальности классическим импульсным методом). Дальности действия такого порядка характерны для ряда реальных систем, использующих коническое сканирование в настоящее время.

Результаты моделирования представлены на рис. 5 как зависимости величины σ_α^2 от параметра Δ_f/Δ_F , характеризующего широкополосность или узкополосность ФНЧ или полосового фильтра. При этом штриховые линии соответствуют нулевому истинному значению Δ_α , а сплошные – ненулевому: для рис. 5, а ненулевое истинное значение $\Delta_\alpha/\theta = 0.01$, а для рис. 5, б $\Delta_\alpha/\theta = 0.1$. Ломаный вид линий, соединяющих рассчитанные точки зависимостей (рис. 5), обусловлен ограниченным количеством K экспериментов, реализуемых для формирования случайных результатов пеленгации и оценивания их дисперсии σ_α^2 ($K = 100$), а увеличение количества экспериментов приводит к нежелательному увеличению времени моделирования. Приведенные на рисунке значения σ_α^2 вычислены в относительных единицах при определенных количественных допущениях об интенсивности принимаемых сигналов и о коэффициентах передачи отдельных

элементов приемного тракта. Конкретизация такой информации не требуется, так как не имеет значения для проводимой сравнительной оценки влияния низко- и высокочастотных спектральных составляющих помехи на качество пеленгации. Действительно, в (12) величина M пропорциональна Δ , а $\Delta = \Delta_\alpha$ при $\Delta_\beta = 0$. Следовательно, на рис. 5 ординаты точек на сплошных линиях, как было отмечено, являются оценками дисперсии результатов пеленгации, отражающими влияние обеих составляющих помехи (низко- и высокочастотной), а ординаты точек на штриховых линиях являются оценками дисперсии, связанной с влиянием только низкочастотной составляющей.

Таким образом, рис. 5 показывает, что соотношение между влиянием низкочастотной составляющей помехи на дисперсию σ_α^2 , являющуюся показателем точности пеленгации, и аналогичным влиянием высокочастотной составляющей зависит от истинного значения измеряемых ошибок сопровождения, которое, конечно, зависит от параметров систем автосопровождения – параметров, определяющих статические и динамические ошибки сопровождения. А именно, при достаточно малой истинной ошибке (при $\Delta_\alpha/\theta = 0.01$, рис. 5, а) точность пеленгации практически полностью определяется влиянием только низкочастотной составляющей помехи, т. е. в этих условиях упоминавшиеся широко известные оценки будут справедливы (для этих условий, как отмечалось, эти оценки и были найдены). К подобному

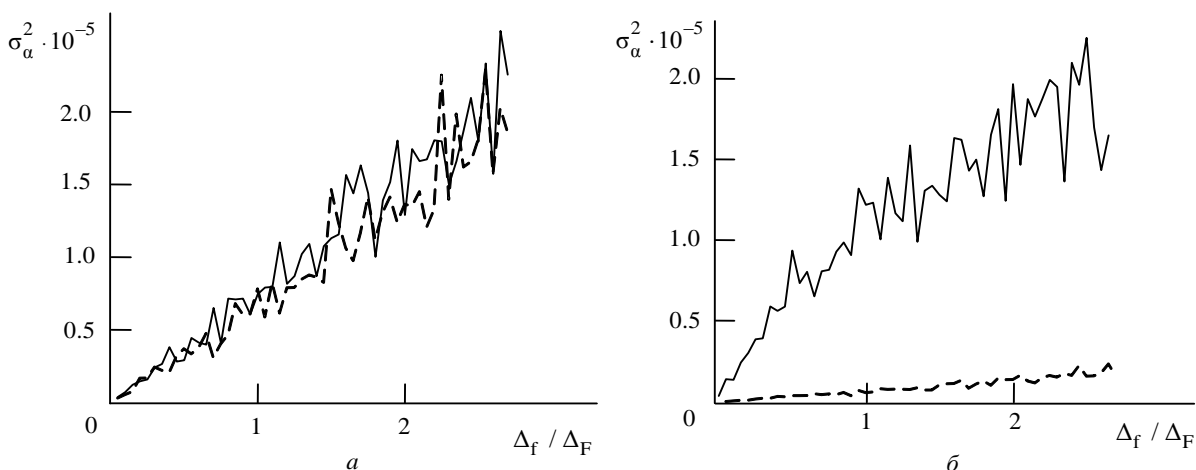


Рис. 5. Дисперсия результатов пеленгации – зависимости от параметра широкополосности фильтров:
 а – для истинного значения $\Delta_\alpha / \theta = 0.01$; б – для истинного значения $\Delta_\alpha / \theta = 0.1$

Fig. 5. Direction finding result variance depending on wide-band parameter of filters:
 а – for true value $\Delta_\alpha / \theta = 0.01$; б – for true value $\Delta_\alpha / \theta = 0.1$

заклучению приводили также и общие соображения, излагавшиеся после (12). Если же пеленгуемый объект сопровождается по угловым координатам при достаточно большой относительной ошибке, то влияние низкочастотной составляющей помехи на точность пеленгации сокращается по сравнению с влиянием высокочастотной составляющей и, например, при истинном значении $\Delta_\alpha/\theta = 0.1$ становится пренебрежимо малым: рис. 5, б показывает, что при этом дисперсия результатов пеленгации, связанная с влиянием только низкочастотной составляющей (штриховая линия), много меньше дисперсии, отражающей влияние обеих составляющих помехи (сплошная линия).

Таким образом, в последнем случае требуется коррекция известных аналитических оценок, учитывающих влияние только низкочастотной составляющей.

Требования к ошибкам сопровождения объекта по угловым координатам. В связи с приведенными количественными результатами необходимо ответить на вопрос о том, какие значения ошибок сопровождения (статических и динамических) по угловым координатам целесообразно обеспечивать при проектировании соответствующих систем. Для этого проведем дополнительный количественный анализ посредством расчетов по найденным аналитическим соотношениям и проверки получаемых результатов при их сопоставлении с соответствующими результатами моделирования.

Опуская детальное описание поиска аналитических расчетных соотношений ввиду его громоздкости, приведем только краткие замечания о его методике и результаты (довольно громоздкими оказываются не только поиск аналитических расчетных соотношений, но и приводимые ниже его результаты).

С целью конкретизации выбираем плоскость отсчета угла α для определения соответствующих статистических параметров ($\beta = 0$). В ортогональной плоскости отсчета угла β подобные параметры определяются аналогично. Замечания об этом будут сделаны в дальнейшем.

В качестве первого из упомянутых статистических параметров определяем дисперсию σ_α^2 с анализом ее зависимости от истинного значения

ошибки сопровождения Δ_α , точнее, от нормированного значения Δ_α/θ при $\Delta_\beta = 0$. Указанные зависимости $\sigma_\alpha^2(\Delta_\alpha)$ и $\sigma_\alpha^2(\Delta_\alpha/\theta)$ можно называть флюктуационными характеристиками [17]. Приведем нормированную флюктуационную характеристику

$$\sigma_{\alpha 0}^2(\Delta_\alpha/\theta) = \sigma_\alpha^2(\Delta_\alpha/\theta) / \sigma_\alpha^2(\Delta_\alpha/\theta = 0). \quad (14)$$

Напомним, что наряду с понятием флюктуационных характеристик мы уже использовали понятие пеленгационных характеристик, которые при игнорировании амплитудных флюктуаций определялись функциями $u_{e\alpha}(\Delta_\alpha)$ и $u_{e\beta}(\Delta_\beta)$. Но из-за рассматриваемых амплитудных флюктуаций результаты $u_{e\alpha}$ и $u_{e\beta}$ обработки сигналов пеленгатором (см. рис. 2) являются случайными величинами. При этом пеленгационные характеристики определяют как зависимости $m_\alpha(\Delta_\alpha)$ и $m_\beta(\Delta_\beta)$ соответствующих математических ожиданий m_α и m_β указанных случайных величин от истинных значений Δ_α (при $\Delta_\beta = 0$) и Δ_β (при $\Delta_\alpha = 0$). Причем аналогично (9) и (10) для линейных участков таких пеленгационных характеристик

$$m_\alpha = \mu_2 \Delta_\alpha, \quad (15)$$

$$m_\beta = \mu_2 \Delta_\beta. \quad (16)$$

Мы определяем пеленгационные характеристики как зависимости от нормированных ошибок сопровождения, в частности, как зависимость $m_\alpha(\Delta_\alpha/\theta)$.

В соответствии с комментариями к рис. 4 математические ожидания (средние значения) m_α и m_β являются полезными сигналами, а величина $\mu_2^2 \sigma_\alpha^2$ при наших обозначениях является дисперсией аддитивной помехи, которая маскирует сигнал m_α . Следовательно, отношение сигнал–помеха, определяемое для пеленгации в плоскости отсчета угла α :

$$q_\alpha(\Delta_\alpha/\theta) = |m_\alpha(\Delta_\alpha/\theta) / [\mu_2 \sigma_\alpha(\Delta_\alpha/\theta)]|, \quad (17)$$

где $|\dots|$ – знак модуля (абсолютной величины).

Статистические характеристики случайных величин, входящие в (14)–(17), находились согласно определениям этих характеристик с использованием рис. 2 и (1), (3), (5)–(11), а также представления случайной (при учете флюктуаций) амплитуды сигнала ошибки модулем полуразности двух других случайных величин – амплитуд импульсов, принимаемых в разное время, а именно с задержкой на $T_{sc}/2$, при учете влияния ФНЧ или полосового фильтра на дисперсию и корреляционные свойства помехи. Получены следующие результаты:

$$\sigma_{\alpha 0}^2(\Delta_{\alpha}/\theta) = 1 + \frac{\left[\left(f'_{0\theta}/f_0 \right)^2 \times \left(1 + r_{sc} \right) (\Delta_{\alpha}/\theta)^2 \right]}{\left(1 - r_{sc} \right)}, \quad (18)$$

$$q_{\alpha}(\Delta_{\alpha}/\theta) = \left| \frac{2.038(m/\sigma)(\Delta_{\alpha}/\theta)}{(\Delta_f/\Delta_F)^{1/2}} \right| \left[\left(1 - r_{sc} \right) / \left(f'_{0\theta}/f_0 \right)^2 + \left(1 + r_{sc} \right) (\Delta_{\alpha}/\theta)^2 \right]^{1/2}, \quad (19)$$

где $f'_{0\theta}$ – модуль производной, определяемый в окрестности равносигнального направления аналогично f'_0 с той разницей, при которой дифференцирование выполняется для функции (сечения трехмерной ДН) от нормированного аргумента, например для функции $f_{\theta}(\alpha/\theta)$ от аргумента α/θ , являющейся сечением трехмерной ДН плоскостью отсчета угла α или нормированного угла α/θ : дифференцируем по указанному нормированному аргументу α/θ , а не по углу α ; $\Delta_p/\theta = 0.5$; причем согласно определению производной применима оценка

$$f'_{0\theta} = \left| f_{\theta}(\Delta_p/\theta - \delta) - f_{\theta}(\Delta_p/\theta + \delta) \right| / (2\delta); \quad (20)$$

положительное

$$\delta \ll 1; \quad (21)$$

при выполнении реального условия $\Delta_f \ll \Delta_F$ оценка коэффициента корреляции амплитудных флюктуаций (помехи), маскирующих полезный

сигнал после его обработки пеленгатором (см. рис. 2), при временном сдвиге $T_{sc}/2$

$$r_{sc} = \left[1 - 0.480(\Delta_f/\Delta_F)/\tau \right]^{(T_{sc}/T_s)/2}. \quad (22)$$

Для расчетов, соответствующих ортогональной плоскости – плоскости отсчета угла β (при $\alpha = 0$), достаточно выполнить замену α на β для нижних индексов у величин в (18) и (19).

Далее приводятся результаты расчетов по (18)–(22) и результаты моделирования для следующих условий: $\Delta_{\beta} = 0$; $T_{sc}/T_s = 10$; $\Delta_p/\theta = 0.5$; $\sigma/m = 0.1$; $\tau = 66T_s$; $\Delta_f/\Delta_F = 0.1$; в расчетах $\delta = 0.005$ схема (см. рис. 2), как и ранее, моделируется при реализации в ней цифровой обработки отсчетов сигнала, сформированных при интервале дискретизации T_s и имеющих амплитуду принимаемых пеленгатором импульсов, когда ФНЧ представляет собой каскадное соединение N_f одинаковых звеньев – рекурсивных фильтров 1-го порядка при $N_f = 4$, а также при $K = 100$.

Результаты расчетов и моделирования представлены на рис. 6 и 7: на рис. 6 представлена нормированная флюктуационная характеристика (14) в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах, а на рис. 7 – зависимость $q_{\alpha}(\Delta_{\alpha}/\theta)$ (см. (17)). Сплошные линии на этих рисунках соответствуют результатам расчетов, а штриховые – результатам моделирования.

Согласно рис. 6 и 7 результаты расчетов и моделирования оказываются близкими (конечно, при таких ошибках сопровождения, которые соответствуют линейному участку пеленгационной характеристики и поэтому представляют практический интерес). Следовательно, найденные расчетные соотношения (18)–(22) и вычисляемые с их помощью количественные оценки являются достаточно точными.

Кроме того, найденные количественные результаты (рис. 7) позволяют ответить на поставленный ранее вопрос относительно предпочтительного значения ошибок сопровождения по угловым координатам, которое целесообразно обеспечить при проектировании систем автосопровождения. Согласно рис. 7 параметры таких систем следует выбирать так, чтобы оцениваемые при пеленгации значения ошибок сопровождения

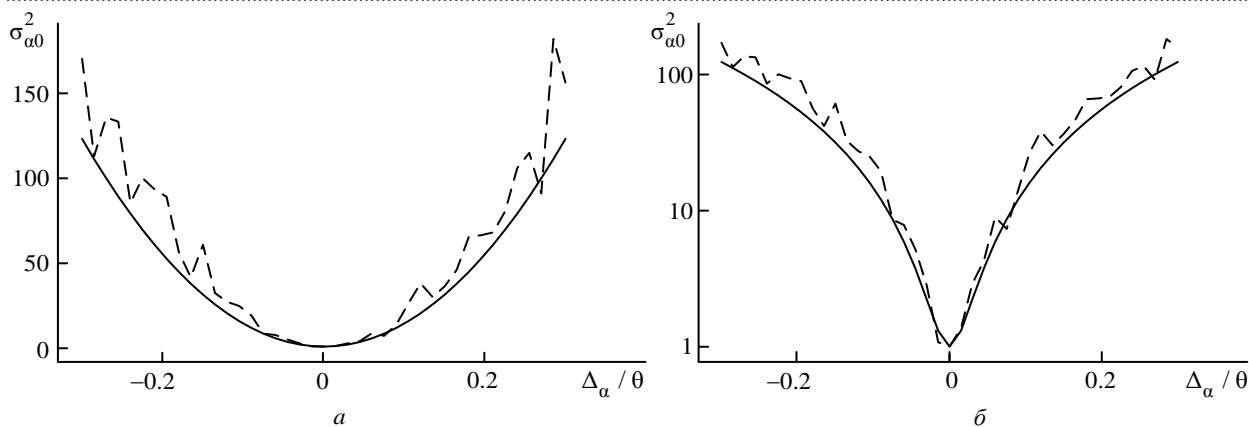


Рис. 6. Нормированная флюктуационная характеристика: *a* – линейный масштаб; *б* – логарифмический масштаб

Fig. 6. Normalized fluctuation characteristic: *a* – linear scale; *б* – logarithmic scale

(значения статических ошибок и наиболее вероятные значения динамических ошибок), будучи нормированными к ширине сканирующей диаграммы направленности, были бы достаточно большими – не менее 0.1. Однако излишнее увеличение упомянутых значений тоже нежелательно, так как может привести к росту негативного влияния неучитываемых внутренних шумов. Следовательно, при указанных условиях оптимальным можно считать такое ожидаемое (наиболее вероятное) значение относительной ошибки сопровождения, например Δ_α , при котором можно приблизиться к выполнению равенства $\Delta_\alpha/\theta = 0.1$. Разумеется, точное выполнение этого или аналогичного равенства не представляется возможным (иначе не требовалась бы пеленгация, т. е. измерение величины Δ_α), но сопровождение объектов по угловым координатам с ошибками, приближающимися к оптимизированным, целесообразно рассматривать как одну из задач проектирования систем автосопровождения. Относительно упоминаемой оптимизации можно уточнить, что ее критерием предполагается максимизация отношения сигнал–помеха, которое

подразумевается в качестве целевой функции и в отличие от (17) должно определяться при том условии, когда помехой являются не только рассматриваемые амплитудные флюктуации, но и аддитивные внутренние шумы радиолокационного приемника. Строгое проведение подобной оптимизации, на наш взгляд, представляло бы интерес при ее увязывании с анализом функционирования соответствующих следящих систем и выходит за пределы данной статьи.

Во избежание возможных вопросов обратим внимание на следующее. В связи с количественными результатами, представленными на рис. 6, рекомендация о сопровождении объекта при достаточно больших значениях Δ_α (в частности, при $\Delta_\alpha/\theta = 0.1$), на первый взгляд, может показаться странной: ведь согласно (14) и рис. 6 это ведет к увеличению σ_α по сравнению со случаем малых Δ_α , т. е. ведет, казалось бы, к ухудшению точности пеленгации (ведь абсолютная погрешность пеленгации растет). Однако не следует забывать, что при этом согласно (15), (17) и рис. 7 достигается желаемое уменьшение более важного показателя точности – модуля отношения среднеквадратичного отклонения σ_α результатов пеленгации (измерения) к истинному значению измеряемой (при пеленгации) величины Δ_α :

$$|\sigma_\alpha/\Delta_\alpha| = 1/q_\alpha, \quad (23)$$

т. е. уменьшается относительная погрешность пеленгации.

Выполнение коррекции при оценке дисперсии результатов пеленгации. Для тех значений ошибок сопровождения, которые определены

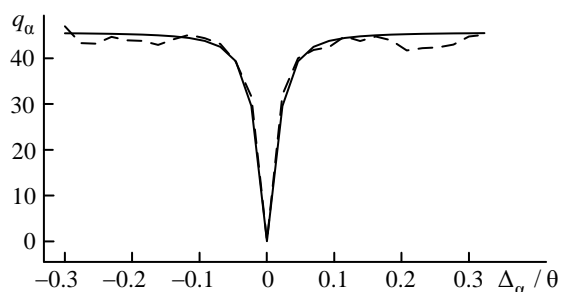


Рис. 7. Отношение сигнал–помеха – зависимости от ошибки сопровождения

Fig. 7. Signal-to-interference ratio depending on tracking error

в качестве предпочтительных (оптимальных), как было показано, требуется коррекция известных аналитических оценок дисперсии. При этом скорректированное значение дисперсии $\sigma_{\alpha}^2(\Delta_{\alpha}/\theta)$ для заданного значения Δ_{α}/θ может быть вычислено следующим образом. Поскольку при достаточно малых ошибках сопровождения, как говорилось, для дисперсии результатов пеленгации справедливы упоминавшиеся широко известные оценки, дисперсия $\sigma_{\alpha}^2(\Delta_{\alpha}/\theta = 0)$ может быть определена как такая известная оценка, например, по (13). После этого по найденным (18), (20)–(22) определяется нормированная дисперсия $\sigma_{\alpha 0}^2(\Delta_{\alpha}/\theta)$, а затем согласно (14) вычисляется искомая величина

$$\sigma_{\alpha}^2(\Delta_{\alpha}/\theta) = \sigma_{\alpha 0}^2(\Delta_{\alpha}/\theta) \sigma_{\alpha}^2(\Delta_{\alpha}/\theta = 0). \quad (24)$$

Таким образом, (18), (20)–(22) и (24) позволяют выполнить коррекцию известных результатов [13, 15], т. е. в совокупности с ними оценить дисперсию результатов пеленгации как показатель абсолютной погрешности пеленгации. Относительная же погрешность пеленгации вычисляется по (19)–(23).

Заметим, что для рассмотренного примера, когда желательным является $\Delta_{\alpha}/\theta = 0.1$, выполненная коррекция приводит к увеличению дисперсии результатов пеленгации приблизительно на 10 дБ (рис. 6).

Заключение. Итак, проведенное исследование показывает, что при выборе параметров для систем автосопровождения с коническим сканированием целесообразно стремиться к реализации сопровождения объектов не с минимальными ошибками по угловым координатам (когда равносигнальное направление практически совмещается с направлением на сопровождаемый объект), а с оптимизированными ошибками (при их оценивании в процессе пеленгации). Иначе говоря, при упомянутом выборе параметров целесообразно оптимизировать значения статических ошибок и наиболее вероятные значения динамических ошибок сопровождения. Причем оптимизированные ошибки имеют такие значения, при которых требуется коррекция известных аналитических оценок для дисперсии результатов пеленгации – качественного показателя пеленгатора (показателя точности). Найденные аналитические соотношения позволяют выполнить указанные оптимизацию и коррекцию. Причем выполнение коррекции способно увеличить оценку дисперсии весьма существенно (в частности, на величину, близкую к 10 дБ).

Авторский вклад

Плужников Анатолий Дмитриевич – теоретический анализ.

Когтева Людмила Владимировна – выбор и обоснование статистических характеристик для флуктуаций.

Приблудова Елена Николаевна – определение взаимосвязей параметров модели с заданными параметрами системы и входных воздействий.

Сидоров Сергей Борисович – разработка программного обеспечения.

Чужайкин Евгений Геннадьевич – уточнение расчетных соотношений, разработка алгоритмов статистической обработки данных.

В подготовке статьи принимали участие все авторы.

Author's contribution

Anatoly D. Pluzhnikov, theoretical analysis.

Lyudmila V. Kogteva, selection and substantiation of statistical characteristics for fluctuations.

Elena N. Pribludova, determination of the relationship between model parameters and set-up parameters of system, input actions.

Sergey B. Sidorov, software engineering.

Evgeniy G. Chuzhaykin, clarification of calculation relations, algorithm development for the statistical data processing.

All authors participated in the preparation of the article.

Список литературы

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / под ред. Я. Д. Ширмана. 2-е изд. М.: Радиотехника, 2007. 512 с. URL: http://publ.lib.ru/ARCHIVES/SH/SHIRMAN_Yakov_Davidovich/ (дата обращения 27.05.2021)
2. Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 1 / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. под ред. В. С. Вербы. М: Техносфера, 2015. 671 с.
3. Павлов В. С., Блудов А. А., Балашов Е. В. Анализ пеленгационного метода конического сканирования в условиях угловых эволюций равносигнального направления // Радиопромышленность. 2017. Т. 27, № 1. С. 37–43. doi: 10.21778/2413-9599-2017-1-37-43
4. Оценка и компенсация поляризационных погрешностей в пеленгационном методе конического сканирования / А. А. Блудов, Г. А. Горбатовский, В. С. Павлов, А. Ф. Суворов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 2. С. 47–54. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-2-47-54
5. Блудов А. А., Горбатовский Г. А., Павлов В. С. Двухшкальная модификация пеленгационного метода конического сканирования // Вопр. радиоэлектроники. 2019. № 2. С. 6–14. doi: 10.21778/2218-5453-2019-2-6-14
6. Новиков Я. В. Концерн ВКО "Алмаз-Антей" готов к решению новых задач по укреплению обороноспособности России // Национальная оборона. 2017. № 8. URL: <https://oborona.ru/pages/mainpage/archive/2017/08/index.shtml> (дата обращения 27.05.2021)
7. Солдаткин А. Надежный "Купол" над войсками // Национальная оборона. 2017. № 8. URL: <https://oborona.ru/pages/mainpage/archive/2017/08/index.shtml> (дата обращения 27.05.2021)
8. Интеллектуальная техника УМЗ // Национальная оборона. 2017. № 8. URL: <https://oborona.ru/pages/mainpage/archive/2017/08/index.shtml> (дата обращения 27.05.2021)
9. Pluzhnikov A. D., Pribludova E. N. Spatial Processing of Radar Signals on a Clutter Background with Non-isotropic Elements of a Cylindrical Array // Signal Processing Symp. Serock, Poland, 5–7 Jun. 2013. Piscataway: IEEE, 2013. P. 126–129. doi: 10.1109/sps.2013.6623577
10. Pluzhnikov A. D., Pribludova E. N., Ryndyk A. G. Cylindrical Array as a means of the Clutter Suppression via Scanning Acceleration and Space-Time Signal Processing // 2014 11th European Radar Conf. Rome, Italy, 8–10 Oct. 2014. Piscataway: IEEE, 2014. P. 561–564. doi: 10.1109/eurad.2014.6991332
11. Pluzhnikov A. D., Pribludova E. N., Ryndyk A. G. The Principle Probabilities of Space-Distance Resolution for a Monostatic Radar and Realization in Cylindrical Array // Intern. J. of Electronics and Communication Engineering. 2019. Vol. 13, № 1. P. 32–35. doi: 10.5281/zenodo.3607832
12. Пат. RU 2 236 727 С1. Антенна с коническим сканированием диаграммы направленности (варианты) / Ю. Д. Самородов; опубл. 20.09.2004. Бюл. № 26.
13. Дымова А. И., Альбац М. Е., Бонч-Бруевич А. М. Радиотехнические системы / под ред. А. И. Дымовой. М.: Сов. радио, 1975. 440 с.
14. Торбин С. А. Влияние угловых перемещений антенны и эклипсинга на точность пеленгации цели радиолокатором с коническим разворачиванием луча на передачу при подавлении активной шумовой помехи в основном лепестке приемной диаграммы направленности // Журн. радиоэлектроники. 2015. № 2. С. 5–11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb15/4/text.html> (дата обращения 08.10.2021)
15. Бартон Д., Вард Г. Радиолокационные системы / пер. с англ. П. Горохова, О. Казакова, А. Тупицына. М.: Воениздат, 1967. 480 с. URL: https://www.studmed.ru/bartonvard-radiolokacionnye-sistemy_eb91c7ddd01.html (дата обращения 27.05.2021)
16. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: КВЦ, 2000. 428 с. URL: https://www.studmed.ru/kuzmin-s3-cifrovaya-radiolokaciya-vvedenie-v-teoriyu_e935bec5442.html (дата обращения 08.10.2021)
17. Артюшенко В. М., Воловач В. И. Алгоритмы оценки информационных параметров сигнала при воздействии широкополосных негауссовских помех // Автометрия. 2018. Т. 54, № 2. С. 43–53. doi: 10.15372/AUT20180205

Информация об авторах

Плужников Анатолий Дмитриевич – д. т. н. (1994), профессор (1995), профессор кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. Автор более 190 научных работ и учебно-методических публикаций в отечественных и зарубежных изданиях, в том числе 12 авторских свидетельств и патентов. Сфера научных интересов – радиолокация и радионавигация. Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, ул. Минина, д. 24, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: pluzhnikov@nntu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5054-8253>

Когтева Людмила Владимировна – к. т. н. (1997), доцент (201), доцент кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. Автор 69 научных публикаций. Сфера научных интересов – прием и обработка сигналов, аналоговая схемотехника, СВЧ-устройства на базе волноведущих структур.

Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, ул. Минина, д. 24, Нижний Новгород, 603950, Россия

E-mail: kogteva@nntu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6983-1652>

Приблудова Елена Николаевна – к. т. н. (2000), доцент (2002), доцент кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. Автор 94 научных публикаций. Сфера научных интересов – пространственно-временная обработка радиолокационных сигналов, адаптивная обработка сигналов, языки программирования.

Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, ул. Минина, д. 24, Нижний Новгород, 603950, Россия

E-mail: pribludova@nntu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1234-2561>

Сидоров Сергей Борисович – к. т. н. (2000), доцент (2002), доцент кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. Автор 32 научных публикаций. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов, траекторная обработка в радиолокации, системное программирование.

Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, ул. Минина, д. 24, Нижний Новгород, 603950, Россия

E-mail: sidorov@nntu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6890-989X>

Чужайкин Евгений Геннадьевич – магистр по направлению "Радиоэлектроника" (2016), инженер Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов, траекторная обработка в радиолокации, системное программирование.

Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, ул. Минина, д. 24, Нижний Новгород, 603950, Россия

E-mail: chuevgenii@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3455-1332>

References

1. *Radioelektronnyye sistemy: osnovy postroeniya i teoriya* [Radioelectronic systems: the basics of construction and theory]. Ed. by Ya. D. Shirman. 2nd ed. M., *Radio-tekhnika*, 2007, 512 p. Available at: http://publ.lib.ru/ARCHIVES/SH/SHIRMAN_Yakov_Davidovich/ (accessed 27.05.2021) (In Russ.)
2. Skolnik M. I. Radar Handbook, Third Ed. Ed. 1. Tr. from eng. V. S. Verba. M., *Technosfera*, 2015, 671 p. (In Russ.)
3. Pavlov V. S., Bludov A. A., Balashov E. V. Analysis of range measurement method of conical scanning in conditions of boresight angle stepping. *Radiopromyshlennost*. 2017, vol. 27, no. 1, pp. 37–43. doi: 10.21778/2413-9599-2017-1-37-43 (In Russ.)
4. Bludov A. A., Gorbатовskij G. A., Pavlov V. S., Suvorov A. F. Estimation and Adjustment of Polarization Errors in Conical Scan Method. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2018, no. 2, pp. 47–54. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-2-47-54 (In Russ.)
5. Bludov A. A., Gorbатовskij G. A., Pavlov V. S. Two-scale modification of conical scanning direction finding method. *Issues of radioelectronics*. 2019, no. 2, pp. 6–14. doi: 10.21778/2218-5453-2019-2-6-14 (In Russ.)
6. Novikov Ya. V. Concern VKO "Almaz-Antey" is ready to solve new tasks to strengthen the defense capability of Russia. *Natsional'naya oborona* [National defense]. 2017, no. 8. Available at: <https://oborona.ru/pages/mainpage/archive/2017/08/index.shtml> (accessed 27.05.2021) (In Russ.)
7. Soldatkin A. Reliable "cupola" over troops. *Natsional'naya oborona* [National defense]. 2017, no. 8. Available at: <https://oborona.ru/pages/mainpage/archive/2017/08/index.shtml> (accessed 27.05.2021) (In Russ.)
8. Intelligent equipment from Ulyanovsk mechanical works. *Natsional'naya oborona* [National defense]. 2017, no. 8. Available at: <https://oborona.ru/pages/mainpage/archive/2017/08/index.shtml> (accessed 27.05.2021) (In Russ.)
9. Pluzhnikov A. D., Pribludova E. N. Spatial Processing of Radar Signals on a Clutter Background with Non-isotropic Elements of a Cylindrical Array. 2013 Signal Processing Symp. Serock, Poland, 5–7 Jun. 2013. Piscataway, IEEE, 2013, pp. 126–129. doi: 10.1109/sps.2013.6623577
10. Pluzhnikov A. D., Pribludova E. N., Ryndyk A. G. Cylindrical Array as a means of the Clutter Suppression

via Scanning Acceleration and Space-Time Signal Processing. 2014 11th European Radar Conf. Rome, Italy, 8–10 Oct. 2014. Piscataway, IEEE, 2014, pp. 561–564. doi: 10.1109/eurad.2014.6991332

11. Pluzhnikov A. D., Pribludova E. N., Ryndyk A. G. The Principle Probabilities of Space-Distance Resolution for a Monostatic Radar and Realization in Cylindrical Array. Intern. J. of Electronics and Communication Engineering. 2019, vol. 13, no. 1, pp. 32–35. doi: 10.5281/zenodo.3607832

12. Samorodov Yu. D. Conically scanning antenna (alternatives). Pat. RU 2 236 727 Publ. 20.09.2004. Bul. no. 26. (In Russ.)

13. Dymova A. I., Al' bats M. E., Bonch-Bruevich A. M. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio systems]. Ed. by A. I. Dymova. M., *Sovetskoe radio*, 1975, 440 p. (In Russ.)

14. Torbin S. A The effect of angular movements of the antenna and eclipsing on the accuracy of target direction finding by a radar with a conical beam deployment on the transmission when suppressing active noise inter-

ference in the main lobe of the receiving radiation pattern. Radio Electronics J. 2015, no. 2, pp. 5–11. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/feb15/4/text.html> (accessed 08.10.2021) (In Russ.)

15. Barton D., Ward H. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radar systems]. Tr. from eng. P. Gorokhov, O. Kazakov, A. Tupitsyn. M., *Voenizdat*, 1967, 480 p. Available at: https://www.studmed.ru/barton-var-d-radiolokatsionnye-sistemy_eb91c7ddd01.html (accessed 27.05.2021) (In Russ.)

16. Kuzmin S. Z. *Tsyfrovaya Radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu* [Digital radar. Introduction to theory]. Kiev, *KVITs*, 2000, 428 p. Available at: https://www.studmed.ru/kuzmin-s3-cifrovaya-radiolokatsiya-vvedenie-v-teoriyu_e935bec5442.html (accessed 08.10.2021) (In Russ.)

17. Artyushenko V. M., Volovach V. I. Algorithms for Estimating Signal Informational Parameters under the Action of Broadband Non-Gaussian Noise. *Avtometriya*. 2018, vol. 54, no. 2, pp. 43–53. doi: 10.15372/AUT20180205 (In Russ.)

Information about the authors

Anatoly D. Pluzhnikov, Dr Sci. (Eng.) (1994), Professor (1995) at the Department of Information Radio Systems of Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev. The author of more than 190 scientific and educational publications in Russian and foreign magazines, including 12 author's certificates and patents. Area of expertise: radar-location and radio navigation.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: pluzhnikov@nntu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5045-8253>

Lyudmila V. Kogteva, Can. Sci. (Eng.) (1997), Associate Professor (2001) at the Department of Information Radio Systems of Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev. The author of 69 scientific publications. Area of expertise: signal receiving and processing, analog circuit design, microwave devices based on waveguide structures.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: kogteva@nntu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6983-1652>

Elena N. Pribludova, Can. Sci. (Eng.) (2000), Associate Professor (2002) at the Department of Information Radio Systems at Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev. The author of 94 scientific publications. Area of expertise: space-time radar signal processing, adaptive signal processing, programming languages.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: pribludova@nntu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1234-2561>

Sergey B. Sidorov, Can. Sci. (Eng.) (2000), Associate Professor (2002) at the Department of Information Radio Systems at Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev. The author of 32 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing, forward scattering radar target tracking, system programming.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: sidorov@nntu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6890-989X>

Evgeniy G. Chuzhaykin, Master in Radio Engineering (2016), engineer at Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev. The author of 1 scientific publication. Area of expertise: radar-location, hardware and software for signal and data processing.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: chuevgenii@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3455-1332>