

## ВОЗМОЖНОСТИ РЛС ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН ПО ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗЫ ЭХО-СИГНАЛА ОТ ЦЕЛИ

д.т.н., проф. О.В. Полярус, к.т.н. Д.В. Карлов, В.Л. Мисайлов

*Рассматриваются точностные характеристики устройства измерения фазы эхо-сигнала от цели в РЛС декаметрового диапазона волн. Приведены результаты, характеризующие потенциальные, флуктуационные и динамические ошибки измерения устройства обработки по точности измерения изменяющейся фазы эхо-сигнала от цели.*

При проведении обработки сигналов в РЛС декаметрового диапазона волн часто требуется обеспечить приемлемую точность измерения фазы сигнала, отраженного от цели, являющейся элементом радиолокационного канала. Влияние всех составляющих радиолокационного канала (приемно-передающее устройство РЛС – ионосфера – цель на фоне подстилающей поверхности Земли) приводит к тому, что фазы эхо-сигнала и пассивной помехи изменяются как случайные функции времени. При этом, естественно, появляются ошибки измерения фазы. Если бы фаза сигнала не изменялась, то причиной ошибок были бы действующие активные и пассивные помехи, а также конструкционная и технологическая неидеальность аппаратуры обработки сигналов. В современных приемниках декаметрового диапазона волн достигается стабильность частоты порядка  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  [1], т.е. за 10 с фаза сигнала самопроизвольно может изменяться на единицы градусов.

Это намного меньше изменений фазы, обусловленных влиянием ионосферы и цели. Поэтому аппаратурными погрешностями фазовых измерений мы в дальнейшем будем пренебрегать. Таким образом, основными причинами фазовых ошибок будут являться влияние ионосферы и цели. Фаза в процессе наблюдения может существенно изменяться. При отслеживании изменяющейся фазы появляются динамические ошибки. Эти ошибки равны нулю только в случаях мгновенного отслеживания фазы следящей системой устройства обработки. Реально эта система имеет ограниченное быстродействие и поэтому не успевает отследить динамику фазовых флуктуаций. Повысить быстродействие можно путем расширения полосы пропускания системы, однако это усиливает помеховое воздействие на устройство обработки. Следовательно, возникает известное противоречие между ошибками измерения фазы, обусловленными действиями помех (флуктуационные ошибки), и динамическими ошибками, появляющимися из-за ограниченности быстродействия системы. В дальнейшем указанные параметры будут оценены.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что в боль-

шинстве случаев закон распределения фазовых флуктуаций является равномерным, а при больших отношениях сигнал/шум может приближаться к нормальному. В последнем случае среднее значение фазы можно считать равным нулю, а среднеквадратическое отклонение фазовых флуктуаций –  $\sigma_\varphi$ .

Обычно эти флуктуации можно разделить на медленные и быстрые. Медленные флуктуации, как правило, обусловлены изменением распределения концентрации электронов в ионосфере со временем, высоты расположения слоев  $E, F1, F2$ , высоты положения максимума электронной концентрации, действием крупномасштабных неоднородностей ионосферы и т.п. Причинами быстрых флуктуаций фазы могут быть влияние мелко-масштабных неоднородностей ионосферы, многолучевость и др.

Эксперименты показывают, что время корреляции фазовых флуктуаций сигналов наклонного зондирования (НЗ) может находиться в пределах от долей секунды – единиц секунд до десяти и более секунд. Последние цифры свойственны условиям распространения сигналов в спокойной ионосфере. Время корреляции фазовых флуктуаций эхо-сигналов от цели уменьшается по сравнению с аналогичным показателем сигнала наклонного зондирования. Обычно динамика полета самолета в стационарном режиме такова, что флуктуации фазы и амплитуды эхо-сигнала малы, однако, если полет самолета осуществляется на малых или на средних высотах над местностью с сильно изменяющимися статистическими характеристиками рельефа, то время корреляции флуктуаций фазы может заметно уменьшиться. Примерно такие же значения свойственны времени корреляции фазовых флуктуаций сигналов возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ).

Рассмотрим случай, когда статистические характеристики фазовых флуктуаций известны точно, и следовательно, можно полагать, что точно известен интервал корреляции  $\tau_k$  случайного процесса, описывающего фазовые флуктуации. Ошибки измерения фазы можно оценить по формуле [2]:

$$\sigma_{\hat{\varphi}}^2 = \frac{N_0}{2P_{cp} \cdot \tau_{k\varphi}}, \quad (1)$$

где  $N_0$  – односторонняя плотность мощности помехи;  $P_{cp}$  – средняя мощность сигнала.

С учетом того, что  $N_0 = \sigma_n^2 / f_\theta$ , где  $\sigma_n^2$  – дисперсия помехового сигнала,  $f_\theta$  – верхняя частота спектра помехи, получаем

$$\sigma_{\hat{\varphi}}^2 = \frac{\sigma_n^2}{2P_{cp} \cdot \tau_{k\varphi} \cdot f_\theta}. \quad (2)$$

Если приближенно спектр помехи принять прямоугольным, то  $f_\theta = 1/2 \tau_{kn}$ , где  $\tau_{kn}$  – время корреляции помеховой реализации. Следовательно, из (2):

$$\sigma_{\varphi}^{\wedge} = \frac{\sigma_n}{\sqrt{P_{cp}}} \cdot \sqrt{\frac{\tau_{kn}}{\tau_{k\varphi}}} \quad (3)$$

В силу специфических свойств активных и пассивных помех в загоризонтной радиолокации соотношение между временами корреляции помехи  $\tau_{kn}$  и фазовых флуктуаций полезного сигнала  $\tau_{k\varphi}$  может быть как меньше, так и больше единицы, в среднем не намного отличаясь от нее. Таким образом, точность измерения фазы в значительной степени определяется энергетическими характеристиками помехи и сигнала, что видно из соотношения (3). Энергетические характеристики сигнала в значительной мере определяются эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР) цели.

На рис. 1 представлены графики зависимости ошибки измерения фазы от ЭПР цели, для различных видов поверхности и протяженности трассы локации. Как видно из графиков, ошибка измерения фазы уменьшается с увеличением ЭПР цели, с уменьшением протяженности трассы локации и выравниванием рельефа местности. При локации целей с большой ЭПР, указанные ошибки могут составлять не более 30 – 50° в широком диапазоне условий.

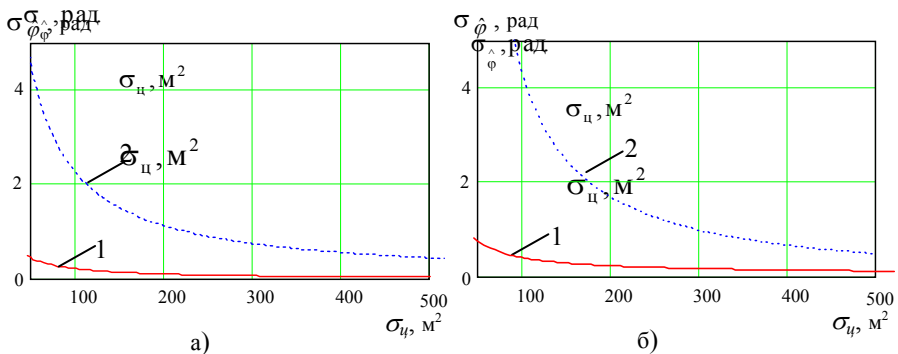


Рис. 1. Ошибка измерения фазы в зависимости от ЭПР цели для различных видов поверхности (1 – равнина, 2 – холмистая поверхность): а) длина трассы 2000 км; б) длина трассы 3000 км

Полученные результаты справедливы при малых доплеровских смещениях частоты эхо-сигнала. Если цель движется в направлении на РЛС, то даже для малоскоростных целей спектр доплеровских частот эхо-сигнала "выходит" из спектра доплеровских частот сигнала ВЧЗ и отношение сигнал/помеха повышается, что ведет к уменьшению  $\sigma_{\hat{\varphi}}$  или к повышению точности измерения фазы.

Отметим, что приведенные результаты характеризуют потенциальные возможности устройства обработки по точности измерения изменяющейся фазы и не учитывают динамических ошибок измерения фазы. Дело в том, что на интервале выборки фазы, равном  $\tau_{k\varphi}$ , учитываются не все измене-

ния фазы, а часть спектра, лежащая выше  $1/(2 \cdot \tau_{к\phi})$ , в измерениях не учитывается, т.е. полоса фильтра как устройства обработки не согласована с полосой частот измерения фазы. Если увеличить полосу частот фильтра, то динамические ошибки измерения фазы уменьшатся, однако при этом, как уже отмечалось, усиливается действие помех. Поэтому вместо интервала выборки  $\tau_{к\phi}$  можно использовать увеличенный интервал времени, в течение которого фазу можно полагать постоянной. Естественно, что точность воспроизведения фазовых зависимостей от времени ухудшится, однако, иногда это может обеспечить снижение помехового влияния на точность измерения фазы. Получение оптимального решения предусматривает минимизацию суммарной ошибки, которая состоит из флуктуационной и динамической ошибок. Для этого производится синтез оптимальных устройств слежения за фазой на основе линейной и нелинейной фильтрации [2 – 4].

На рис. 2, 3 получены зависимости абсолютного значения динамической ошибки изменения фазы и отношения флуктуационной ошибки фазы к динамической от времени корреляции фазы  $\tau_{к\phi}$  (времени измерения фазы) для различных условий радиолокации.

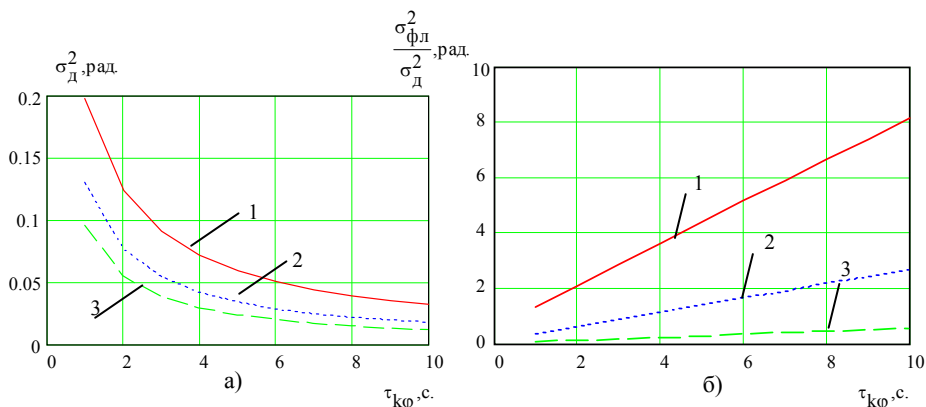


Рис. 2. Зависимости абсолютного значения динамической ошибки фазы и отношения флуктуационной ошибки фазы к динамической от времени корреляции фазы  $\tau_{к\phi}$ , для  $\sigma_{\phi}^2 = 1$  (кривая 1 – для  $q=1$ ; кривая 2 – для  $q=10$ ; кривая 3 – для  $q=100$ )

Динамические и флуктуационные ошибки измерения фазы составляют до единиц градусов для отношений сигнал/шум  $q_0$  более 10 дБ при дисперсии фазовых флуктуаций  $\sigma_{\phi}^2 = 1 \text{ рад} (\approx 60^\circ)$  и до несколько десятков градусов для дисперсии фазовых флуктуаций  $\sigma_{\phi}^2 = 3 \text{ рад} (\approx 150^\circ)$  в пределах су-

существующего промежутка времени корреляции фазы. Как видно из представленных зависимостей, динамическая ошибка с увеличением времени корреляции  $\tau_{k\varphi}$  уменьшается и точность измерения фазы увеличивается (рис. 2, а, рис. 3, а). Это нельзя сказать о поведении флуктуационной ошибки измерения фазы (рис. 2, б, рис. 3, б). Ее поведение свидетельствует о том, что в измерениях фазы более весомую роль играет флуктуационная ошибка. Способ борьбы с ней, как видно из представленных зависимостей, это увеличение отношения сигнал/помеха  $q_0$ .

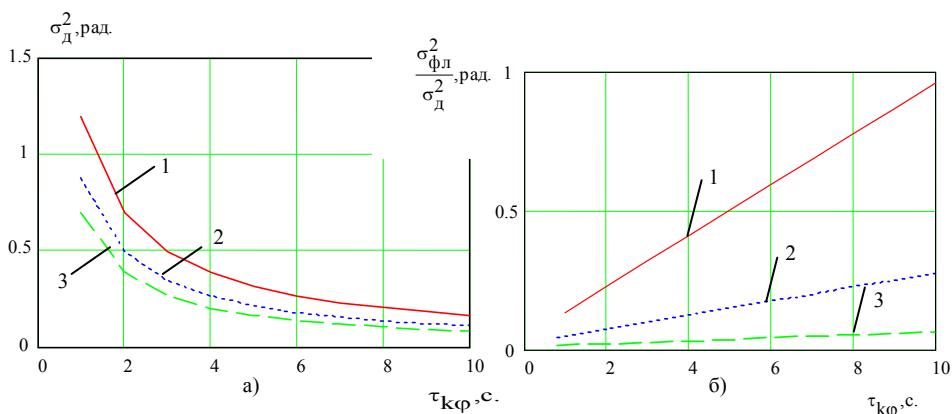


Рис. 3. Зависимости абсолютного значения динамической ошибки фазы и отношения флуктуационной ошибки фазы к динамической от времени корреляции фазы  $\tau_{k\varphi}$ , для  $\sigma_\varphi^2 = 3$  (кривая 1 – для  $q = 1$ ; кривая 2 – для  $q = 10$ ; кривая 3 – для  $q = 100$ )

Таким образом, проведенный анализ показывает, что при отношениях сигнал/шум порядка 10 дБ и более, точность измерения фазы декаметрового сигнала, прошедшего невозмущенную ионосферу, может составлять единицы – десятки градусов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Головин О.В. Профессиональные радиоприемные устройства декаметрового диапазона. – М.: Радио и связь, 1985. – 288 с.
2. Пестряков В.Б. Фазовые радиотехнические системы. – М.: Сов. радио, 1968. – 468 с.
3. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
4. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты. – М.: Связь, 1972. – 447 с.

Поступила 20.11.2002

**ПОЛЯРУС Александр Васильевич**, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры ХВУ. Окончил ВИРТА в 1980 году. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

**КАРЛОВ Дмитрий Владимирович**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр. научного центра при ХВУ. Окончил ХВУ в 1995 году. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

**МИСАЙЛОВ Виталий Леонидович**, адъюнкт ХВУ. Окончил ХВУ в 2000 году. Область научных интересов – радиолокация и радионавигация.

---