

Измерение дальности в фазометрической радионавигационной системе при воздействии мощных помех

В. С. Бахолдин, Д. А. Леконцев

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
vka@mil.ru

Аннотация. Рассмотрены принципы построения и недостатки фазовых радионавигационных систем, используемые в морской навигации. Представлен способ измерения дальности в фазометрической радионавигационной системе при воздействии мощных помех и рассмотрены возможности его применения. Приведены результаты моделирования совместной обработки масштабных частот как единого сигнала для измерения дальности.

Ключевые слова: радионавигационная система, метод измерения дальности, фаза сигнала, некротная шкала, разрешение неоднозначности

I. ВВЕДЕНИЕ

В первых образцах фазометрических радионавигационных системах (РНС) требуемая точность определения координат судна определялась расстоянием визуальной видимости до препятствия (цели) и возможностью совершения маневра (уклонения от столкновения). Сравнительные характеристики современных спутниковых и наземных РНС, использующих фазовый метод измерений представлены в таблице.

ТАБЛИЦА I ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННЫХ РНС

Используемый диапазон волн в РНС	Дальность действия, км	СКП определяя НП $m_{ш}$, м	СКП определения места M , м
СДВ (РСДН-20, «Омега»)	10 000–12 000	600	3 000–15 000
ДВ (РСВТ-1с, Марс-75, РСДН-3, Декка, Лоран-С)	600	60	60–300
СВ (РС-10, Лоран-А, Брас)	До 200	15	15–150
ВЧ (ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou)	Глобально	0,5	1–10

Поэтапное развитие требований к точности решения навигационной задачи (НЗ) и реализация их в традиционных наземных РНС типа «Декка-Навигатор» (сокращенно «Декка»), «Лоран», «Омега», «Чайка» привело к необходимости разработки и созданию глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) (ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou), обеспечивающих радионавигацию морских судов не только в дальней, но и в ближней зоне, включая точное определение координат вблизи берегов, в узкостях и на подходах к портам, что позволило устранить недостатки разработанных ранее систем. Результаты применения навигационной аппаратуры потребителей (НАП)

позволили существенно сократить огромный парк приемной аппаратуры, установленной практически на всех военных кораблях, большинстве морских транспортных судов. Однако ГНСС, имея громадный потенциал в морской навигации, оказались чрезвычайно уязвимы при воздействии помех вследствие низкого уровня сигнала у поверхности земли. В ГНСС существуют методы повышения отношения сигнал/шум применение которых позволит решать некоторые задачи [1]. Уже сегодня воздействие потенциального противника на радионавигационное поле (РНП) ГНСС сложно предугадать и быть на шаг впереди него становится недостижимой задачей. В районах, где глобальное РНП может отсутствовать важно обеспечивать навигацию судов с помощью других радионавигационных систем. Таким образом, полный отказ от существующих РНС представляется нецелесообразным. Каждая из существующих фазометрических наземных РНС обладает набором своих недостатков. Например, РНС средней дальности действия «Декка», относящаяся к классу гиперболических фазовых РНС с частотной селекцией сигналов и работающая в длинноволновом диапазоне волн, не позволяет автономно определить номер дорожки (зоны), в пределах которой находится потребитель навигационной информации (судно). Для определения номера зоны необходимо использовать средства счисления либо другие средства навигационных определений, обеспечивающих точность не хуже половины ширины зоны РНС. Дополнительные погрешности измерений, вызванные влиянием подстилающей поверхности на поверхностные волны в диапазонах СДВ, ДВ и СВ можно компенсировать, учитывая ее параметры [2]. Несмотря на значительную большую мощность излучаемых и принимаемых сигналов в таких системах их работоспособность также зависит от отношения сигнал/шум.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ФАЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ДАЛЬНОСТИ

Полная фаза сигнала зависит не только от дальности R при фиксированной частоте колебаний ω , но и от текущего времени t и начальной фазы φ_0 . Математическое выражение полной фазы колебания имеет следующий вид:

$$\Phi = \Phi(t, R, \varphi_0) = \varphi(t) + \varphi(R) + \varphi_0.$$

Полная фаза сигнала Φ может быть использована для измерения дальности нее при условии выделения из полной фазы информативного слагаемого $\varphi(R)$. Исключение зависимости полной фазы колебания от времени и начальной фазы может быть выполнено в

результате вычитания, сравнения полных фаз двух колебаний.

Основным способом измерения дальности в наземных фазометрических РНС является использование различных масштабных частот, излучаемых несколькими станциями, а разрешение неоднозначности происходит на каждой из них и осуществляется как в многошкальном методе разностно-дальномерного режима измерения. Обработка сигнала при приеме и измерении дальности производится при оценке каждого узкополосного сигнала в отдельности.

Помимо многошкального метода разрешить свойственное фазовому методу противоречие можно, используя некоторые методы устранения неоднозначности (многозначности) отсчета дальности. Если масштабное колебание одно и выбрано из условия обеспечения точности измерения, то расширить пределы однозначного измерения дальности можно, используя метод перемещающегося интерферометра (метод так называемого «радиолога») и метод перестройки частоты (метод собственного дальномера, метод скачка частоты или метод манёвра частоты).

Первый основан на подсчете целого числа полных циклов изменяющейся разности фаз при изменении расстояния и получения таким образом полного приращения фазы с учетом дополнительной части полного цикла и расчете дальности. Второй метод основан на перестройке частоты масштабного колебания (изменения его длины волны) и получения таким образом информации об искомой дальности путем подсчета при этом также целого числа полных циклов приращения фазы [3]. В многошкальных фазовых РНС применяется метод синтезированной (разностной) длины волны.

Шумы препятствуют точному определению фазового сдвига и с увеличением отношения сигнал/шум q_0 потенциальная ошибка измерения фазового сдвига $\sigma_{\text{фаз}}$ уменьшается: $\sigma_{\text{фаз}} = 1/\sqrt{q_0}$ (рад). С учетом этого потенциальная среднеквадратическая ошибка измерения дальности фазовыми методами будет определяться [4]:

$$\sigma_{\text{дл}} = \frac{\lambda_m}{4\pi\sqrt{q_0}} \text{ (м)}.$$

Как видно, всем фазовым дальномерам присуще противоречие: увеличение масштабной частоты способствует повышению точности измерений, но уменьшает предел однозначно измеряемой дальности.

Кроме этого, уменьшение отношения сигнал/шум может привести не только к невыполнению условий согласованности шкал, но и к невозможности вообще выполнять фазовые измерения дальности. Снижение отношения сигнал шум может быть вызвано не только наличием мощных помех различного происхождения, но снижением чувствительности радиоприёмного устройства или уменьшением его коэффициента усиления вследствие различных причин. Естественно, что при нахождении судна на дальностях, превышающих установленную рабочую зону РНС, отношение сигнал/шум также оказывается неудовлетворительным.

III. ИЗМЕРЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МНОГОЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСА

Таким образом существует проблема обеспечения работоспособности бортовой радионавигационной аппаратуры судна при низком отношении сигнал/шум. При этом следует заметить, что потенциал дальности действия фазометрических наземных РНС до конца не раскрыт, с учетом принципиальной возможности получения решения навигационной задачи, пусть даже и с меньшей точностью, чем в стандартном режиме.

Для реализации измерения дальности при воздействии мощных помех предлагается использовать «сформировать» сигнальную конструкцию в виде многочастотного импульса [5, 6]. Такой импульс с дискретной частотной модуляцией (ДЧМ) получается при рассмотрении последовательности излучаемых масштабных частот, как единого сигнала период повторения которого соответствует полному циклу фазовых измерений на каждой шкале. Формирование сигнальной конструкции в виде суммарного обрабатываемого сигнала на приемной стороне подразумевает расширение спектра и увеличении отношения сигнал/шум.

Различные частоты, используемые при формировании многочастотного импульса, можно рассматривать как когерентные гармонические колебания в том смысле, что они жестко связаны между собой в дробно-рациональном отношении и хорошо иллюстрируются с помощью интерференционных представлений. Рассмотрим модель многошкальной фазометрической системы и продолженного способа измерения дальности.

На рис. 1а) представлены шесть масштабных частот фазометрической РНС, излучаемых последовательно в пределах одного цикла измерений на рис. 1б) и принимаемый сигнал в условиях воздействия мощных помех 1в).

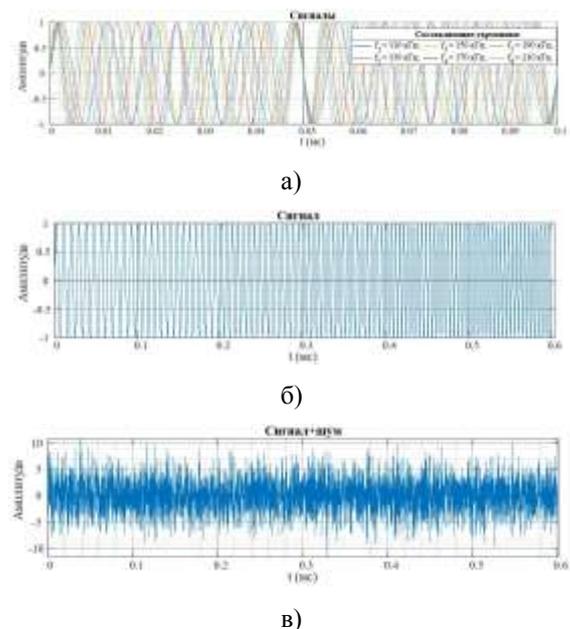


Рис. 1. Формирование сигнальной конструкции

Среднеквадратическое значение шума задано равным амплитуде принимаемого сигнала, что не позволяет фактически выполнять фазовые измерения.

На рис. 2а) представлена автокорреляционная функция ДЧМ импульса, а на рис. 2б) – взаимокорреляционная функция принимаемого сигнала и предложенной сигнальной конструкции.

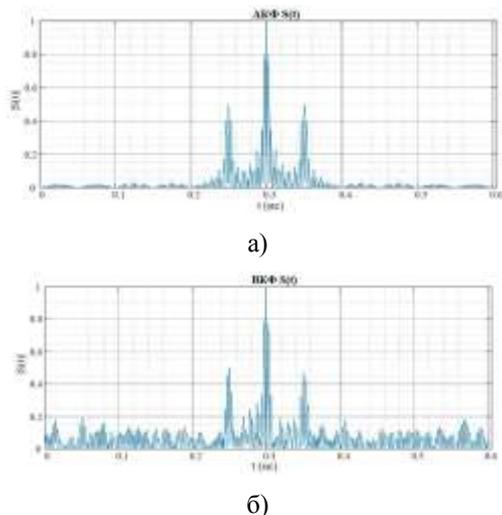


Рис. 2. Авто- и взаимокорреляционная функции сигнала

Спектр сигнала представлен на рис. 3а), б) и в) условиях помех 3в).

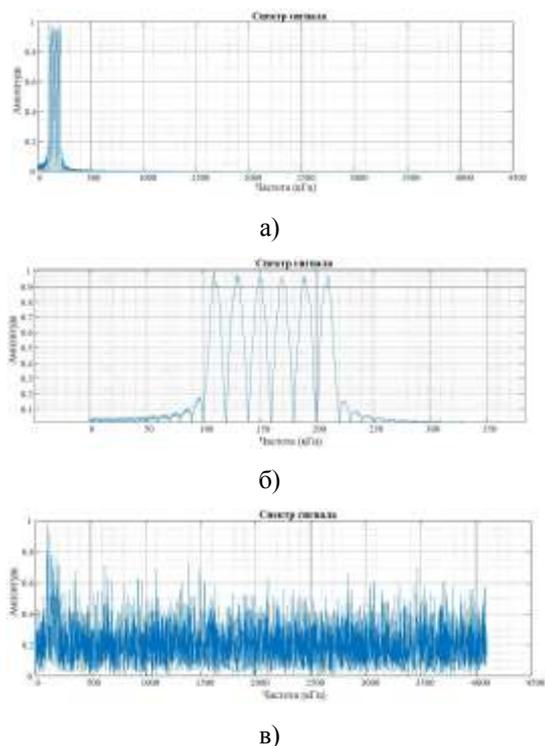


Рис. 3. Спектр сформированного импульса

Результаты моделирования показывают, что применение предложенного метода обеспечивает измерение дальности и решения НЗ в условиях, когда использование фазовых измерений невозможно.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод формирования сигнальной конструкции, позволяет предложить новые способы совместной обработки узкополосных сигналов, объединение которых можно рассматривать как сигнальную конструкцию с ДЧМ. Сигнал РНС, в которой для измерения дальности фазовым методом используются несколько измерительных шкал можно рассматривать и обрабатывать как импульсный сигнал с ДЧМ. Реализация такого способа обработки позволит в случае низкого отношения сигнал/шум и невозможности получения фазовых измерений на каждой из шкал реализовать измерения дальности, используя суммарную энергию всех спектральных составляющих сигнальной конструкции, независимо от последовательного или одновременного способа их формирования и излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Алешкин А.П., Бахолдин В.С., Гаврилов Д.А. Леконцев Д.А. Обработка сигналов спутниковых навигационных систем с квадратурным уплотнением и частотным разделением // Известия Вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. Вып. 4. С. 261–267.
- [2] Алешечкин А. М., Тронин О. А. Повышение точности определения радионавигационных параметров для систем дальней радионавигации // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16. № 2. С. 292–299.
- [3] Маслов М.М. Основы теории радиотехнических измерений параметров движения. МО СССР, 1971 г. 751 с.
- [4] Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. М., «Сов. радио», 1975, 336 с.
- [5] Вишин Г.М. Многочастотная радиолокация. М.: «Воениздат», 1973, 89 с.
- [6] Бахолдин В.С., Леконцев Д.А. Концептуальная модель радиотехнической системы траекторных измерений на основе технологии формирования некратных измерительных шкал // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 11. С. 14–21.