

ОСОБЕННОСТИ ЮСТИРОВКИ АНТЕННО-ФИДЕРНОЙ СИСТЕМЫ В КОМПЛЕКСЕ ПЕЛЕНГОВАНИЯ КВ-ДИАПАЗОНА

Александр Викторович ДУБРОВИН родился в 1962 г. в городе Находке Приморского края. Генеральный директор ЗАО «Радио ТН». Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области пассивной радиолокации. Автор более 10 научных работ.

Alexander V. DUBROVIN, Ph.D., was born in 1962, in the Primorsky Territory. He is the Director General at the Radiy TN Joint-Stock Company. His research interests are in the passive techniques for radar location estimation. He has published more than 10 technical papers.

Рассмотрены вопросы юстировки на примере фазовых измерений в двухканальной системе. Выявлены основные факторы, влияющие на точность измерений разностей фаз. Предложены методы по их компенсации, а также критерий, позволяющий оценить степень этой компенсации. Показано, что для выбранной системы с помощью предложенных мер удалось сократить среднюю погрешность измерений фаз в 2,5 раза.

Введение

В работе [Л] проведен синтез и анализ пассивной системы, состоящей из узкобазовых подсистем. В модель входного воздействия включены полезный сигнал и шумы. Влияние систематических ошибок в [Л] не рассматривалось по следующим причинам. Во-первых, усложнение модели входного воздействия «утяжелило» бы задачу в целом и не позволило бы найти приемлемые для практики решения. Во-вторых, для каждой системы существуют свои, присущие только ей, особенности, и в большинстве случаев требуются решения, носящие частный характер.

В узкобазовой подсистеме наиболее сложным с точки зрения учета систематических ошибок узлом является антенно-фидерная система. Данная статья посвящена выявлению закономерностей возникающих отклонений и с помощью их учета в алгоритме измерений сведению к минимуму влияния систематических ошибок на качество оценок. Достаточно удобно исследовать фазовые зависимости на примере двухканальной системы. В данной работе рассматривается поведение разностей фаз между сигналами, принимаемыми двумя пространственно разнесенными антеннами, в зависимости от угла прихода и частоты, а также предлагаются методы по учету и компенсации систематических ошибок.

1. Постановка задачи

Рассмотрим следующую фазометрическую систему (рис. 1). На площадке располагаются: две антенны A_1 и A_2 , равноотстоящие от центра измерительной системы на расстояние $d = 2$ м, расположенные на линии север—юг и подключенные с помощью фидерных линий ко входу измерителя; выносной гетеродин (ВГ), отстоящий от центра на

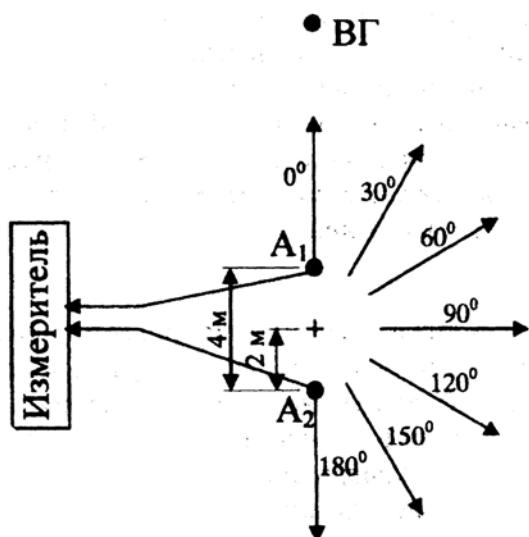


Рис. 1. Взаимное расположение антенн, выносного гетеродина и измерительной системы

расстояние $r = 60$ м и перемещавшийся по направлениям относительно севера $0, 30^\circ, 180^\circ$. ВГ излучает импульсный сигнал с частотой 500 кГц. В частотной области он выглядит как набор гармоник, отстоящих друг от друга на эти самые 500 кГц. В результате измерений разностей фаз получаем кривые, представленные на рис. 2. Здесь показаны зависимости разностей фаз от частоты для семи направлений (цифры на кривых соответствуют направлениям), где 1-е направление соответствует углу $\gamma_1 = 0$, 2-е — $\gamma_2 = 30^\circ$ и т.д. Рядом с кривыми, отображающими измеренные значения, штрихпунктирными линиями показаны прямые, рассчитанные теоретически. По оси X откладываются значения частоты в герцах, по оси Y — разности фаз в градусах.

Анализ рис. 2 показывает, что даже чисто визуально заметны отклонения, которые носят систематический характер. В задачу данной работы входит выявление причины возникновения подобных отклонений, а также определение путей их корректировки.

2. Выявление источников погрешностей измерений и поиск путей компенсации систематических ошибок

Как видно из рис. 2, для уменьшения погрешностей измерений фаз необходимо провести коррекцию измерений. В качестве параметра, характеризующего точность юстировки, выберем следующую величину, которую назовем выборочным отклонением (ВО):

$$\sigma_\phi = \left(\frac{1}{KN} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (\Phi_{\text{изм}}(k, n) - \Phi_T(k, n))^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

где $\Phi_{\text{изм}}(k, n)$ и $\Phi_T(k, n)$ — соответственно измеренные и теоретические значения разностей фаз на частоте $f(k)$ и направлении n ; K и N — количество частот и направлений. В нашем случае для измерений используются частоты 1,5—30 МГц с дискретностью 0,5 МГц. Число частот $K = 58$, число направлений $N = 7$.

Значение ВО без корректировки для измерений, представленных на рис. 2, $\sigma_\phi = 3,98^\circ$.

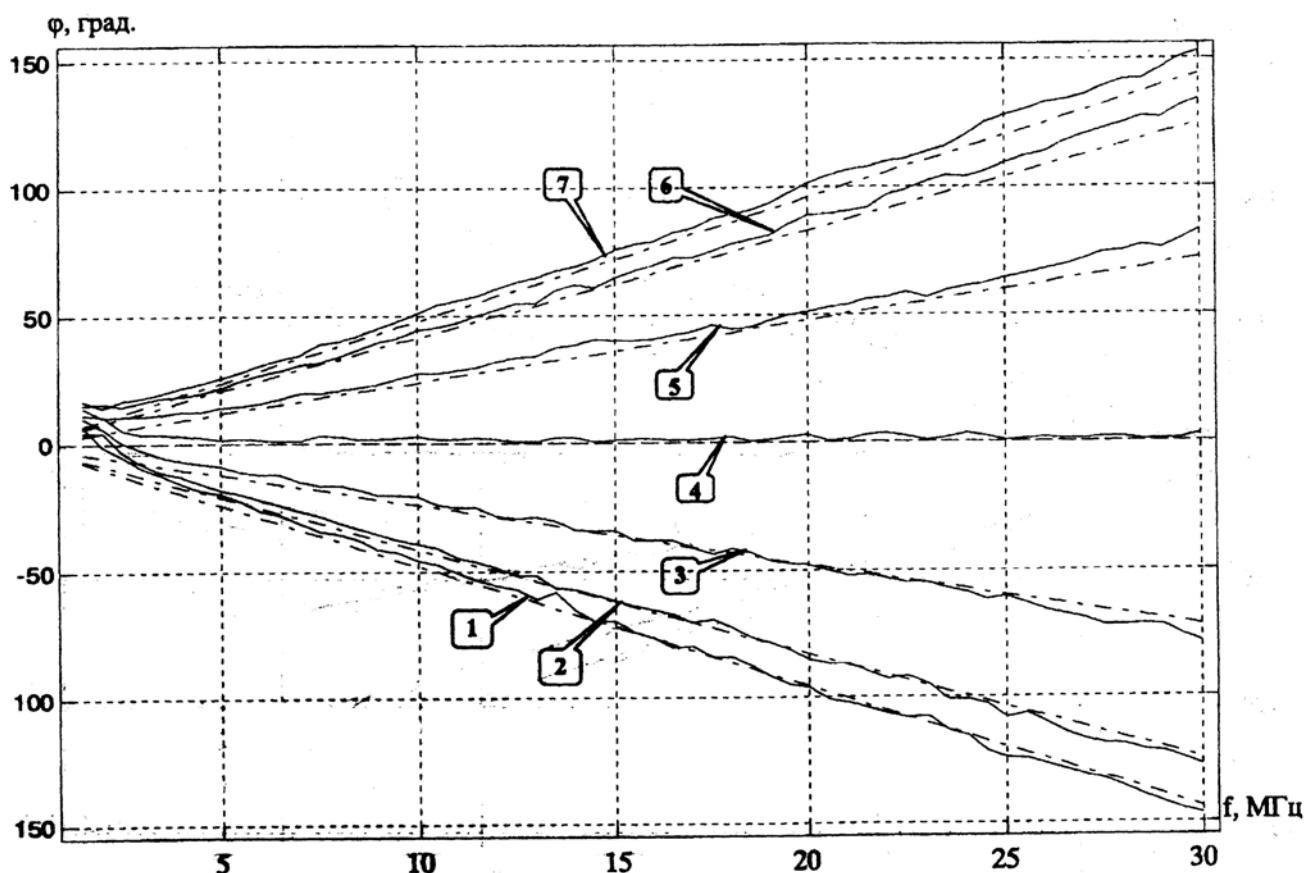


Рис. 2. Зависимости измеренных и теоретических значений разностей фаз без коррекции

Существуют две основные причины, позволяющие заранее предсказать появление систематических ошибок. Первая причина — разное время прохождения сигнала от антенн до измерителя (сам измеритель имеет систематическую составляющую). Вторая — несовпадение геометрического центра с электромагнитным (следует оговориться, что в рассматриваемом эксперименте влияние этого фактора оказалось крайне незначительным).

Для коррекции погрешностей, обусловленных первой причиной — неидентичностью трактов, целесообразно внести фазовые поправки, причем для каждой частоты свою поправку. Правило частотно-фазовой коррекции выглядит следующим образом:

$$F(\hat{\phi}_{\text{кор}}(k)) = \min F(\phi_{\text{кор}}(k)), \quad (2)$$

$$\text{где } F(\phi_{\text{кор}}(k)) = \sum_{n=1}^N (\phi_{\text{изм}}(k, n) - \phi_{\text{кор}}(k) - \phi_t(k, n))^2.$$

После выполнения действий, описываемых (2), получим новое значение ВО:

$$\sigma_{\phi_1} = \left(\frac{1}{KN} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (\phi_{\text{изм}}(k, n) - \hat{\phi}_{\text{кор}}(k) - \phi_t(k, n))^2 \right)^{1/2}. \quad (3)$$

ϕ , град.

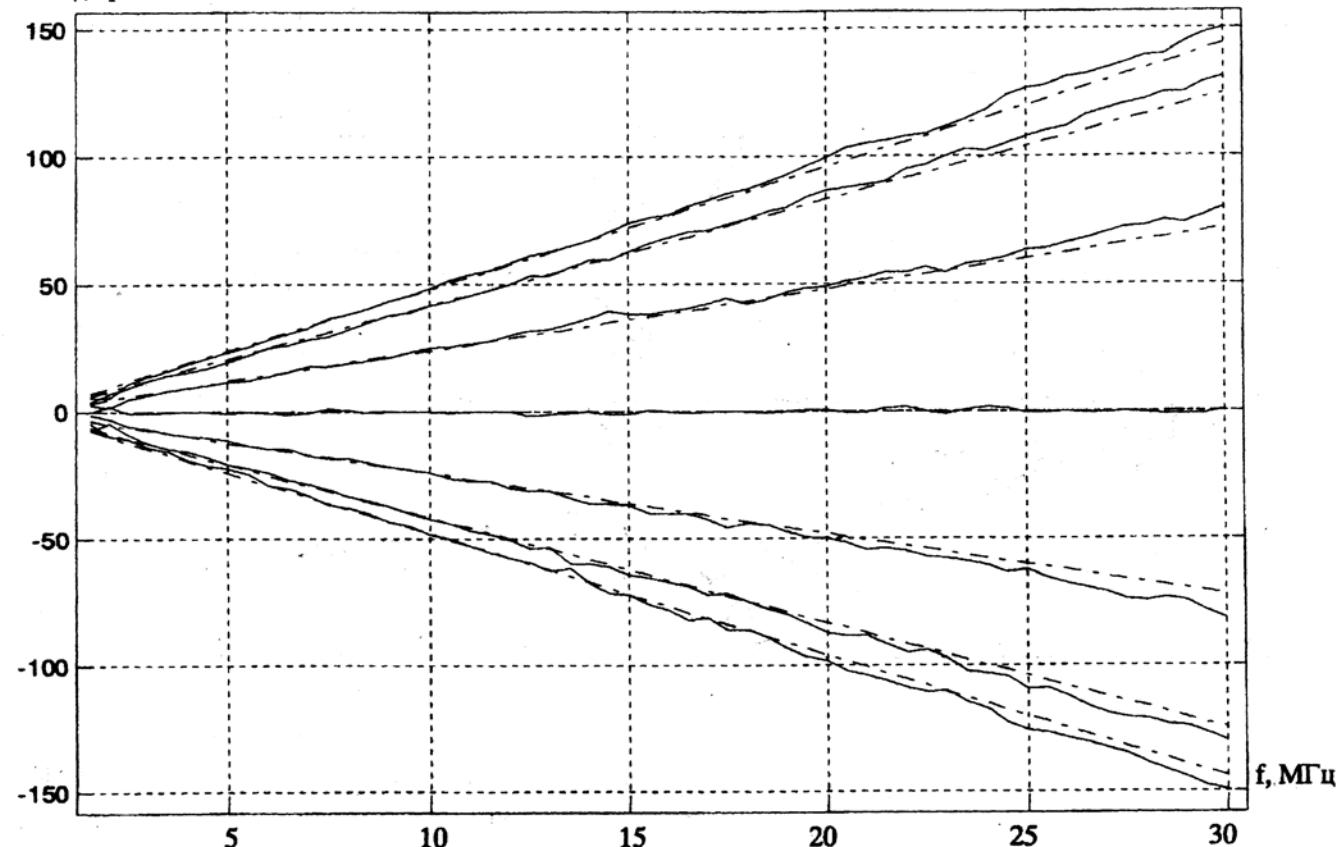


Рис. 3. Зависимости измеренных и теоретических значений разностей фаз после первого шага коррекции

Значения скорректированных разностей фаз $\phi_{\text{к1}} = \phi_{\text{изм}}(k, n) - \hat{\phi}_{\text{кор}}(k)$ представлены на рис. 3 (штрихпунктирные линии соответствуют теоретическим значениям). Выполнение операции (2) позволяет получить новое значение ВО $\sigma_{\phi_1} = 2,67^\circ$.

После того как скорректировали разности фаз, замечаем, что фазы в зависимости от частоты изменяются нелинейно. Это говорит о том, что в каналах существует пусть и небольшая разница во временных шкалах. То есть несмотря на то что оба канала синхронизируются от одного гетеродина, частоты квантования как бы отличаются друг от друга. Это объясняется тем, что у гетеродина существуют так называемые фазовые шумы (это порождает плавание в небольших пределах частоты гетеродина). Из-за наличия разницы в расстоянии от гетеродина до каналов АЦП и получается частотное расхождение. Оценим теперь частотную идентичность каналов. Кроме того, на этом шаге будет уместно уточнить фазовый центр одной из антенн, предполагая, что фазовый центр другой антенны совпадает с геометрическим центром. Сразу следует оговориться, что возможен поиск фазовых центров сразу двух антенн. Однако в этом случае функция

F очень слабо зависит от взаимного изменения координат антенн.

Сформируем теперь правило измерения следующих систематических отклонений:

$$F(\hat{k}, \hat{x}_2, \hat{y}_2) = \min F(k, x_2, y_2), \quad (4)$$

где k — коэффициент сжатия сигнала в одном канале относительно другого; x_2, y_2 — координаты фазового центра второй антенны (в нашем случае это южная антenna);

$$F(k, x_2, y_2) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N [(\varphi_{\text{изм}}(k, n) - \hat{\varphi}_{\text{кор}}(k))(1 - kf(k)) - \Delta_\varphi(x_2, y_2, k, n) - \varphi_T(k, n)]^2;$$

$$\Delta_\varphi(x_2, y_2, k, n) = \frac{2\pi f(k)}{c} \left\{ [(x_2 - r \sin(\gamma_n))^2 + (y_2 - r \cos(\gamma_n))^2]^{1/2} - [(x_1 - r \sin(\gamma_n))^2 + (y_1 - r \cos(\gamma_n))^2]^{1/2} - 2d \cos(\gamma_n) \right\}.$$

В результате нахождения минимума $F(k, x_2, y_2)$ получим новое выражение для ВО:

φ , град.

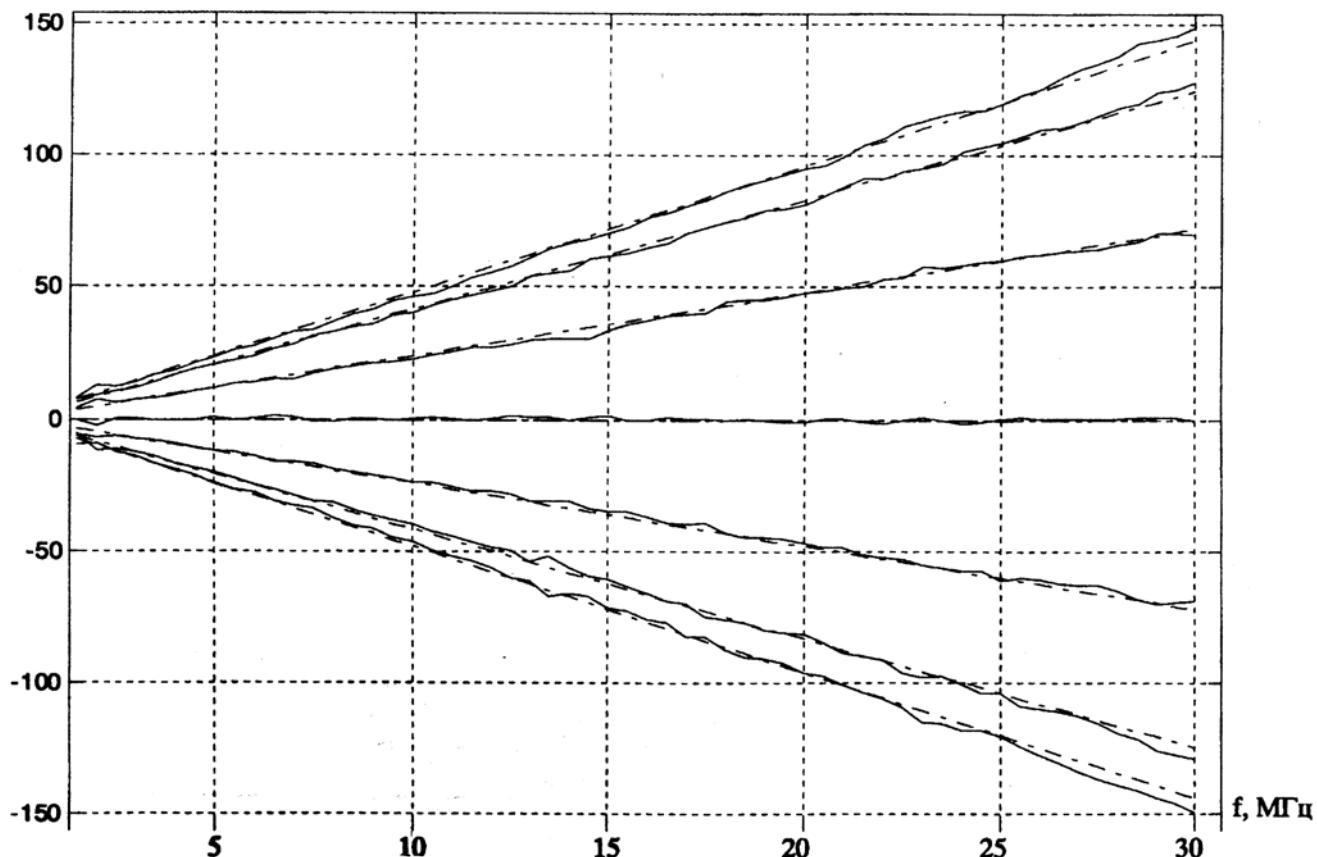


Рис. 4. Зависимости измеренных и теоретических значений разностей фаз после второго шага коррекции

$$\sigma_{\varphi_2} = \left\{ \frac{1}{KN} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N [\varphi_{\text{изм}}(k, n) - \varphi_T(k, n)]^2 \right\}^{1/2}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{изм}}(k, n) &= \\ &= (\varphi_{\text{изм}}(k, n) - \hat{\varphi}_{\text{кор}}(k))(1 - kf(k)) - \Delta_\varphi(\hat{x}_2, \hat{y}_2, k, n). \end{aligned}$$

Вычисления в соответствии с (5) дают результат $\sigma_{\varphi_2} = 1,59^\circ$.

Зависимости скорректированных разностей фаз $\varphi_{\text{изм}}(k, n)$ представлены на рис. 4, где штрихпунктирные линии соответствуют теоретическим значениям.

Следует заметить, что основной вклад в процесс минимизации по правилу (4) внес поиск по параметру k . В то же время уточнение фазовых центров является достаточно актуальной задачей, поскольку на практике при развертывании комплекса пеленгования не всегда удается достаточно точно измерить геометрические координаты антенн. В нашем случае в результате выполнения математических действий в соответствии с (4) удалось по-

лучить следующие оценки: $\hat{x}_2 = -0,0098$ м, $\hat{y}_2 = -1,6962$. То есть по оси X (запад-восток) уточнения практически не произведено, а по оси Y (юг-север) фазовый центр «подтянулся» почти на 30 см.

Выводы

Рассмотрен процесс юстировки двухэлементной антенно-фидерной системы. Выявлены два основных источника возникновения погрешностей измерений — фазовая и частотная неидентичности трактов. Помимо этого, рассмотрен вопрос уточнения фазового центра одной из антенн. Показано, что совместное решение данных задач возможно, при этом выборочное отклонение, характеризующее среднюю погрешность фазовых измерений, может быть уменьшено с $3,98^\circ$ до $1,59^\circ$.

Summary

Adjustment features of antenna-feeding system in direction finding complexes for HF band are considered. The consideration is carried out for some example of a phase measurement in a two-channel system. Major factors are revealed which influence on measuring accuracy for a difference of phases. Some techniques are offered to compensate these factors as well as a criterion to estimate a degree of the compensation. An average measuring error can be reduced from 3.980 down to 1.590 value using these techniques.

Библиографический список

Дубровин А.В., Сосулин Ю.Г. Одноэтапное оценивание местоположения источника радиоизлучения пассивной системой, состоящей из узкобазовых подсистем // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 2. С. 156-170.

ЗАО «РадиоТН»

Статья поступила в редакцию 10.10.2004