

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

УДК 551.510.536

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ТЕХНИКЕ
ИОНОСФЕРНОГО ЛЧМ ЗОНДИРОВАНИЯ*М. И. Беленький, А. А. Станкевич*

В работе предлагается для уточнения высоты отражения измерить фазовую задержку огибающей ЛЧМ сигнала, дополнительно подвергнутого амплитудной модуляции.

В технике ионосферного зондирования к настоящему времени сложились два основных направления. Первое направление представлено традиционными ионозондами, использующими в качестве зондирующего импульсный сигнал. Наиболее типичным цифровым ионозондом такого типа можно считать Digisonde 128 PS, описанный в [1]. Представителями второго направления являются ионозонды, использующие для зондирования сложные или шумоподобные сигналы. В качестве таких сигналов применяются сигналы с линейной частотной модуляцией [2] или импульсные сигналы с фазово-кодовой модуляцией [3]. Не останавливаясь на сравнении достоинств и недостатков ионозондов этих двух направлений, отметим, что в ионозондах первого направления сравнительно просто производится уточнение высоты отражения с привлечением фазовых измерений.

Так в работе [1] уточнение действующих высот производится путем измерения разности фаз при изменении частоты зондирования на заданную величину (на заданный шаг приращения по частоте). При этом для достижения высокого высотного разрешения реализуется режим сравнения фаз для двух шагов приращения по частоте. Абсолютные значения этих приращений согласованы между собой таким образом, что если большее значение частотного приращения обеспечивает высокое высотное разрешение, то меньшее значение разрешает фазовую неоднозначность первой оценки, следующей из использования большего значения. Например, пусть измерены фазовые сдвиги $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ на частотах $f_0, f_1 = f_0 + 10$ кГц, $f_2 = f_0 + 100$ кГц, соответственно. Тогда, действующая высота отражения h' будет равна, с одной стороны, $\frac{c}{4\pi} \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{10 \text{ кГц}}$,

а, с другой стороны, $\frac{c}{4\pi} \frac{\varphi_2 - \varphi_0}{100 \text{ кГц}}$. Фазовая 2π неоднозначность означает, что $\varphi_1 - \varphi_0$ и $\varphi_2 - \varphi_0$ нам известны с точностью до аддитивной добавки, кратной 2π . Соответственно, фазовая неоднозначность действующей высоты h' составляет в первом случае 15 км и во втором — 1,5 км. В этих высотных диапазонах фазовые измерения уточняют действующую высоту. Допустим, что фаза измеряется с точностью не хуже 36 градусов, а измерение групповой задержки отраженного сигнала позволяет определить действующую высоту h' с точностью 15 км. Тогда, измерение разности фаз на частотах f_0, f_1 уточняет h' в этом интервале с точностью 1,5 км, а измерение на частотах f_0, f_2 уточняет h' в интервале 1,5 км до 150 м.

Использование подобного подхода в технике, например, ЛЧМ зондирования представляется затруднительным в силу того, что зондирующая частота непрерывно изменяется. Темой настоящего сообщения является предложение, позволяющее реализовать режим фазовых измерений при использовании сигнала с линейной частотной модуляцией. Это предложение заключается в дополнительной амплитудной модуляции ЛЧМ несущей.

В этом случае высота отражения, определяемая с точностью порядка $\frac{c}{2 \cdot \Delta f}$, где Δf — величина девиации частотно-модулированного сигнала, может быть уточнена путем измерения фазы огибающей амплитудно-модулированного сигнала. Действительно, при излучении амплитудно-модулированного сигнала

$$u(t) = u_0[1 + m \cos(2\pi Ft)] \sin \int_0^t 2\pi f(t_1) dt_1,$$

где m — глубина модуляции, F — частота модуляции, f — частотно-модулированная несущая, и при наличии не более одного отражения на частоте зондирования (девиация которой предполагается малой по сравнению с самой частотой) огибающая отраженного сигнала будет сдвинута по фазе на угол $\varphi = \frac{4\pi h' F}{c}$, где h' — действующая высота отражения.

Возьмем для примера обычно применяемое в ЛЧМ ионозонде значение девиации $\Delta f = 100$ кГц. Тогда точность определения высоты по групповой задержке составит 1,5 км. Применяя амплитудную модуляцию с частотой $F = 100$ кГц и считая, что фаза огибающей может быть определена с точностью порядка 36 градусов, аналогично вышеприведенному примеру из [1] получим точность оценки высоты, равной 150 м. Отметим, что при девиации 10 кГц ошибка грубого определения высоты составит 15 км и уточненного 1,5 км. Таким образом, будет достигнуто повышенное частотное разрешение при сохранении высотного.

При стандартном ЛЧМ-зондировании принимаемый сигнал перемножается с сигналом ЛЧМ гетеродина и передается в узкополосном тракте, что дает выигрыш в отношении сигнал/шум. В случае предлагаемой нами амплитудной модуляции ЛЧМ сигнала для получения такого же отношения сигнал/шум потребуются два узкополосных тракта, с гетеродинными сигналами, сдвинутыми между собой на частоту АМ модуляции.

Следуя [2], оценим точность измерения фазы сигнала при заданном отношении сигнал/шум. Считаем принимаемый сигнал $x_A = A \cos(\omega t + \theta)$ суммой полезной $x_S = S \cos(\omega t)$ и шумовой компоненты $x_N = N \cos(\omega t + \epsilon)$. Тогда для произвольного t можно написать систему уравнений

$$\begin{cases} A \cos \theta = S + N \cos \epsilon, \\ A \sin \theta = N \sin \epsilon. \end{cases}$$

Откуда

$$\begin{cases} A = \sqrt{(S + N \cos \epsilon)^2 + (N \sin \epsilon)^2}, \\ \operatorname{tg} \theta = \frac{N \sin \epsilon}{S + N \cos \epsilon} = \frac{\sin \epsilon}{S/N + \cos \epsilon}, \end{cases}$$

$$\theta(\epsilon) = \operatorname{arctg} \frac{\sin \epsilon}{S/N + \cos \epsilon}.$$

Полагая ϵ случайной величиной, равномерно распределенной на $(-\pi, \pi]$, выпишем два первых момента случайной величины $\theta(\epsilon)$

$$E\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \theta(\epsilon) d\epsilon,$$

$$D\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [\theta(\epsilon)]^2 d\epsilon - (E\theta)^2.$$

Так как функция $\theta(\epsilon)$ нечетная, $E\theta = 0$. Зависимость среднеквадратичной ошибки $\sqrt{D\theta}$ от отношения сигнал/шум S/N взята нами из [2] и приведена на

рис. 1. Из графика видно, что при отношении сигнал/шум 5 дБ среднеквадратичная погрешность определения фазы составляет менее 36 градусов.

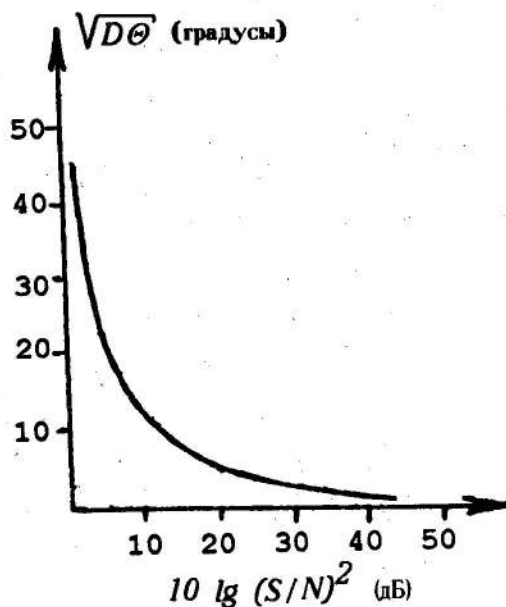


Рис. 1.

Рассмотренная выше процедура уточнения действующей высоты может быть эффективно применена при использовании ЛЧМ ионозонда в патрульном режиме зондирования, который в [4] описан под названием *Kinesonde Mode*. Указанный режим заключается в регистрации действующих высот отражения на ряде выбранных частот зондирования. В общем случае число и значение этих частот выбирается произвольно. Например, выбираются частоты, связанные с особенностями высотно-частотной характеристики (перегибы, области вблизи критических частот и т.п.), динамика изменения которых представляет интерес для исследования. Ионограммный режим работы ионозонда позволяет выбрать патрульные частоты, удовлетворяющие среди прочих требованию — не более чем одного отражения. С помощью фазовых измерений можно определить действующие высоты точнее и, следовательно, регистрировать их малые изменения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bibl K., Reinisch B. W. //Radio Science. 1978. V.13, N 3. P.519.
2. Poole A. W. V. //Radio Science. 1985. V.20, N 6. P.1609.
3. Coll D. C., Storey J. R. //Radio Science. 1964. V.68D, N 10. P.1155.
4. Wright J. W., Putteway M. L. V. //Radio Science. 1979. V.14, N 5. P.815.

НКТБ "Радиофизика" и НИИ
физики Санкт-Петербургского
государственного университета

Поступила в редакцию
20 января 1993 г.

PHASE MEASUREMENT APPLICATION IN THE IONOSPHERE SOUNDING BY FMCW SIGNAL

M. I. Belenkij, A. A. Stankevich

The sounding of the ionosphere by FMCW signal with additional amplitude modulation is suggested. It is shown that the measurement of the phase delay of the envelop allows to define the virtual heights more precisely.