

А. Л. ОСТРОВСКИЙ, Ю. И. СПИЦЫН

О НЕКОТОРЫХ ПОГРЕШНОСТЯХ РАДИОГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ, ВЫЗЫВАЕМЫХ ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Метод радиодальномерных измерений прочно вошел в практику геодезических работ при плановом обосновании картографирования и решении различного рода инженерных и специальных задач.

При этом к точности планового обоснования предъявляют все более высокие требования в связи с потребностями крупномасштабных съемок.

В ряде работ советских и зарубежных ученых остро ставится вопрос об электромагнитной совместимости радиотехнических средств различного назначения.

В геодезической литературе практически отсутствуют предложения по обеспечению электромагнитной совместимости геодезических радиодальномеров с другими радиоэлектронными

средствами, имеющими в настоящее время большую плотность в полосе рабочих частот (или их двух первых гармоник) и значительную мощность в энергетическом пространстве.

Доказательством необходимости решения задачи электромагнитной совместимости геодезических радиодальномеров (РДС-2, РДГ, РДГВ и др.) может служить их одновременная работа с такими средствами, как радиoliniи связи с искусственными спутниками Земли, радиотехническими средствами навигации и посадки самолетов, радиовысотомерами, радиолокационными станциями, радиорелейными линиями связи, работающими в диапазоне 1...12 Гц.

Отмечено, что сигналы, излучаемые одним или несколькими радиоэлектронными средствами, проникают на вход приемного тракта геодезических фазовых радиодальномеров в том случае, когда спектральные компоненты этих сигналов, во-первых, совпадают по частоте с основными или побочными каналами приема и, во-вторых, когда мощность этих компонентов не ниже реальной чувствительности приемного тракта.

Как известно [5], наиболее опасные и вероятные варианты влияния посторонних радиоэлектронных средств:

1. Совпадение главной части спектра постороннего сигнала и примыкающих к нему первых, наиболее интенсивных, гармоник с полосой пропускания основного канала приема.

2. Совпадение частот внеполосных или побочных компонентов спектра внешнего излучения с полосой пропускания основного канала приема.

3. Совпадение главной части спектра и примыкающих к нему первых, наиболее интенсивных, гармоник с полосой пропускания побочных каналов приема.

4. Попадание в побочные каналы приема наиболее мощных побочных излучений, особенно на гармониках несущей частоты мешающего сигнала.

5. Комбинация вариантов 1—4.

В радиодальномерах РДГ, РДГВ и других для передачи полезного сообщения, чтобы увеличить помехоустойчивость этих приборов, применяется сложная комбинация модуляции частот (несущей частоты — частотная и импульсная).

Тем не менее простота преобразования сигнала и выделения промежуточной частоты в приемном тракте указанных выше радиодальномерных фазовых систем и применение нелинейных элементов в цепях преобразования сигнала (резонансные контуры) — причина статистически переменной во времени фазовой нестабильности сигнала в тракте усилителя промежуточной частоты в результате нелинейного преобразования смеси полезного сигнала и сигнала внешних источников электромагнитного излучения.

В индикаторном блоке ведомой станции из синусоидального разностного сигнала измерительных частот в 1 кГц в момент перехода напряжения синусоидального сигнала через нуль фор-

мируется импульсный сигнал. Фаза импульсного сигнала остается неизменной как при неискаженной начальной фазе несущей, так и при отсутствии в преобразованном сигнале паразитных компонентов.

Действительно, сдвиг точки перехода через нуль [6] в общем виде можно определить как корень уравнения

$$\sin \omega t - \sum_{n=2}^n K_{nf} \sin (n\omega t + \varphi_n) = 0, \quad (1)$$

где ω — частота преобразования; t — текущее время; φ_n — начальная фаза синусоидального сигнала.

Коэффициент K_{nf} является коэффициентом передачи схемой комбинационных составляющих, близких или равных к промежуточной частоте, он равен отношению амплитуды сигнала помехи к амплитуде полезного сигнала:

$$K_{nf} = \frac{U_n}{U_c}. \quad (2)$$

Если в синусоиде лишь одна комбинационная составляющая и условие максимального сдвига точки перехода через нуль в зависимости от φ_n $\frac{\partial \omega t}{\partial \varphi_n} = 0$, то

$$\Delta \varphi_{\max} = \arcsin K_{nf}, \quad (3)$$

а в случае n — комбинированных составляющих

$$[\Delta \varphi_{\max}]_n = \arcsin \sum_{n=2}^n K_{nf}. \quad (4)$$

Учитывая, что угол $\Delta \varphi$ мал, приближенно имеем:

$$\Delta \varphi_{\max} = \sum_{n=1}^n K_{nf}, \quad (5)$$

а для одного канала при $n=2$

$$\Delta \varphi_{\max} \approx \frac{U_n}{U_c} \text{ (рад)} \approx 57^\circ,3 \frac{U_n}{U_c}, \quad (6)$$

или для n комбинаций

$$[\Delta \varphi_{\max}]_n = 0,6 [(K_{f \max})_{1, 2, 3, \dots, n}]. \quad (7)$$

В работе [8] доказано, что фазовая погрешность не изменяется при увеличении количества преобразований и целиком вместе с полезным сигналом поступает на измерительное устройство.

Амплитудный ограничитель радиодальномера снижает до порогового уровня паразитную амплитудную модуляцию, сопутствующую любому частотно-модулированному (ЧМ) колебанию, но не ограничивает в необходимой степени амплитуду сигнала помехи. Автоматическая регулировка усиления радиодальномера при суммарной амплитуде комбинационных составляющих смеси сигнала более порогового уровня схемы не эффективна как средство защиты от внешних электромагнитных полей.

Следовательно, в формуле, характеризующей измеряемый фазовый сдвиг, следует по модулю добавить выражение (7):

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2' + [\Delta\varphi_{\max} n], \quad (8)$$

где $\Delta\varphi_1$ — фаза синусоидального сигнала 1 кГц, выделяемого ведущей станцией; $\Delta\varphi_2'$ — фаза импульсного сигнала 1 кГц, сформированного ведомой станцией [7].

Из работы [10] известно, что

$$\Delta\varphi = 2\omega_1 \frac{D_{\text{изм}}}{c}. \quad (9) \quad \text{Тогда } \Delta\varphi - [\Delta\varphi_{\max}] = 2\omega_1 \frac{D_{\text{изм}}}{c} \quad (10)$$

и с учетом (7)

$$D_{\text{изм}} = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\omega_1} - \left(0,6c \cdot \frac{[(K_f \max)_{1, 2, 3, \dots, n}]}{\omega_1} \right). \quad (11)$$

Нами проведены экспериментальные исследования точностных характеристик фазового радиодальномерного комплекса РДГВ при постановке внешнего электромагнитного поля ведущей станцией радиодальномера РДГ (станция помех).

Исследования производили на нескольких несущих частотах станции помех с частотной модуляцией несущей частотой 10 МГц и без амплитудной модуляции при направленном ($20 \dots 22^\circ$ к оси диаграммы направленности антенны ведущей станции) и круговом излучении со снятым параболическим отражателем на стадии помех. При этом станция помех оказывала одновременное воздействие на обе станции радиодальномерного комплекса.

Характеристики частот излучения несущих станций радиодальномера и станции помех в зависимости от положения шкалы настройки резонатора клистронов показаны на рис. 1.

Линия длиной 3,5 км измерена комплектом радиодальномера РДГВ 10-ю приемами в спокойном энергетическом пространстве. Средний результат этих измерений обозначим $D_{\text{опт}}$. Мощность внешних ЭМП в полосе рабочих частот радиодальномера и двух первых гармоник по основному и зеркальному каналам приема измеряли с помощью измерителя потока мощности высокочастотной энергии П-3-9.

Измерения показали полное отсутствие поля помех на указанных выше частотах.

В результате измерений средняя квадратическая погрешность, полученная по внутренней сходимости равна $\pm 14,8$ мм, что в относительной мере дает 1 : 238000.

В ходе измерений снимались частотная характеристика дискриминатора ведущей станции и частота следования импульса полезного сигнала.

На сводных графиках (рис. 2—4) показаны изменения частотной характеристики УПЧ, напряжения АРУ, частоты следования импульса полезного сигнала и времени прохождения измеряемого расстояния сигналом ведущей станции в ходе некоторых измерений без помех и с детерминированной помехой, аддитивной с полезным сигналом. Измерения с наличием помех выполняли сериями по три приема.

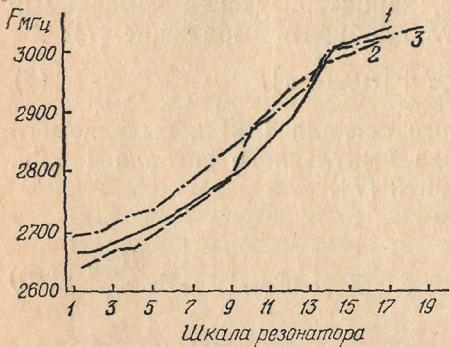


Рис. 1. Диаграмма частот настройки станций:

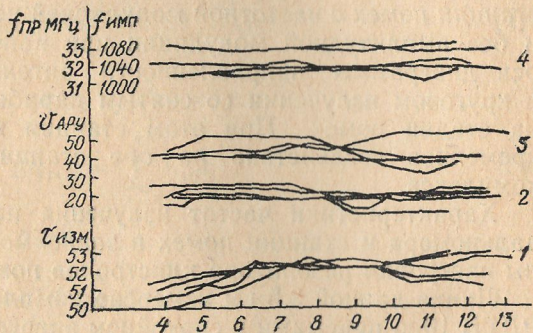
1 — станции помех; 2 — ведомой станции; 3 — ведущей станции.

Из графиков следует, что сигнал помехи вызывает появление на нагрузке смесителя комбинационных составляющих, которые вносят дополнительный фазовый сдвиг полезного сигнала, характеризующийся резким спадом графика точных величин, как это и следует из формулы (11).

Кроме того, из графиков частотной характеристики дискриминатора и частоты следования импульсного сигнала видно, что они почти полностью повторяют ход графика изменения точных

Рис. 2. Характеристика прохождения сигнала в приемнике ведущей станции при отсутствии помех:

1 — график точных величин; 2 — график изменений напряжения АРУ; 3 — характеристика сигнала промежуточной частоты; 4 — характеристика сигнала на нагрузке частотного детектора.



величин, тогда как график АРУ имеет в основном довольно спокойный характер и незначительные спады на пиках падения частотной характеристики усилителя промежуточной частоты.

Следовательно, сигнал детерминированной помехи вызывает завал частотной характеристики УПЧ радиодальномера в сторону низших частот и, как известно из работ [3, 4, 9], изменение

фазовой характеристики УПЧ, поскольку частота и фаза полезного сигнала при любом числе преобразований однозначно связаны соотношением

$$\varphi(t) = \int \omega t dt. \quad (12)$$

Результаты экспериментальных исследований соотношения (11) при различных частотах настройки станции помех и ее антенного поля приведены в таблице.

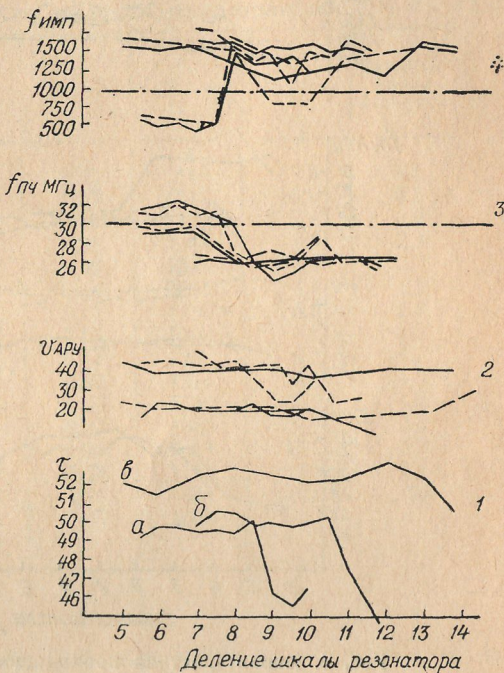


Рис. 3. Характеристика прохождения полезного сигнала в условиях помех в случае направленного излучения станции помех при модуляции несущей 10 МГц:

1 — график точных величин при мощности сигнала помехи: а — 10 усл. ед., б — 40 усл. ед., в — 60 усл. ед., 2 — график изменений напряжения АРУ; 3 — характеристика смеси полезного сигнала и помехи на промежуточной частоте; 4 — характеристика смеси полезного сигнала и помехи на нагрузке частотного детектора.

Как известно [4],

$$\delta\varphi = \Delta\tau 2\pi f, \quad (13)$$

причем здесь

$$\Delta\tau = \frac{\Delta D}{150} \text{ нс.} \quad (14)$$

Средняя погрешность измерений [8], представленных в таблице,

$$v = \pm \frac{\sum |\Delta D|}{n} = \pm \frac{2139}{16} = \pm 133,7 \text{ мм.} \quad (15)$$

После перехода к средней квадратической погрешности имеем:

$$m = \pm \frac{5}{4} v = \pm 167,3 \text{ мм; } N = \frac{m}{D_{\text{опт}}} = \frac{1}{21000}. \quad (16)$$

Эксперимент убедительно показывает, что точность измерений при воздействии помех на радиодальномерный комплекс падает более чем в десять раз и не удовлетворяет требования инструкции полигонометрии 4-го кл.

Как видно из формулы (11), погрешность ΔD имеет отрицательный знак. Результаты эксперимента, приведенные в таблице, подтверждают это.

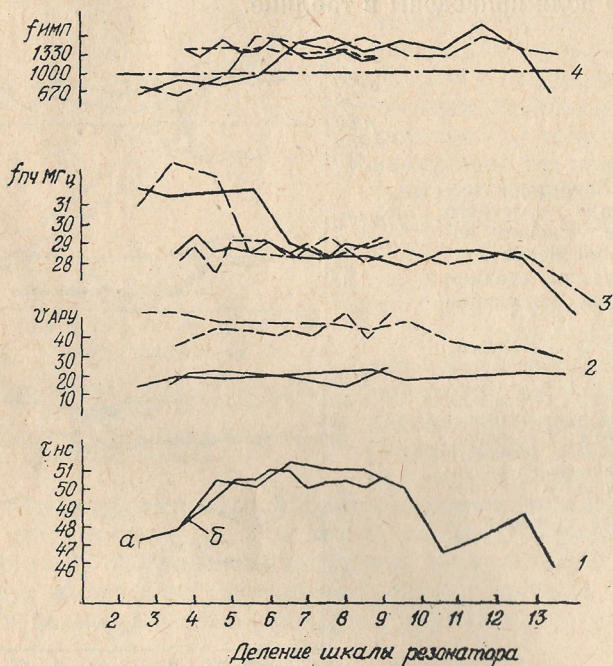


Рис. 4. Характеристика проходящего полезного сигнала в условиях помех при круговом излучении станции помех без модуляции несущей:

1 — график точных величин при мощности сигнала помехи: а — 5 усл. ед., б — 60 усл. ед.; 2 — график изменений напряжения АРУ; 3 — характеристика смеси полезного сигнала и помехи на промежуточной частоте; 4 — характеристика смеси полезного сигнала и помехи на нагрузке частотного детектора.

Эксперимент показал, что поле внешнего источника электромагнитного излучения в полосе основных рабочих частот радиодальномера РДГВ вводит дополнительную погрешность в измерение времени распространения радиоволн по фазе разностного сигнала модуляционных (измерительных) частот, причем эта погрешность достигает 2 нс при мощности потока энергии поля помех порядка 30 МВт, а в отдельных приемах, особенно при совпадении частоты несущей станции помех и частот станций радиодальномерного комплекса 5...6 нс, вызывает погрешность в измеряемом расстоянии 75...90 см.

При увеличении мощности внешнего поля до 80...90 МВт на экране фазометра наблюдаются либо неустойчивый, либо вращающийся, либо челночно колеблющийся по окружности разрыв или, наконец, три—семь разрывов, а также полное подавление полезного сигнала. На частотной характеристике УПЧ в этом случае имеем глубокие провалы в область низших частот, которые выходят за пределы полосы пропускания усилителя промежуточной частоты радиодальномера (6МГц).

Результаты экспериментальных исследований

| Средние арифметические значения результатов измерений с помехами | ΔD | Δt , нс | f_i , Гц | $\delta\varphi$, грал. | Давление шкалы фазометра |
|--|------------|-----------------|------------|-------------------------|--------------------------|
| 3528,769 | —286 | 1,91 | 1465 | 17,6 | 4,9 |
| 3528,790 | —265 | 1,77 | 1517 | 16,9 | 4,7 |
| 3528,995 | — 60 | 0,40 | 1122 | 2,8 | 0,8 |
| 3528,908 | —147 | 0,98 | 1344 | 8,3 | 2,3 |
| 3528,906 | —149 | 0,99 | 1348 | 8,4 | 2,3 |
| 3528,974 | — 81 | 0,54 | 1285 | 4,4 | 1,2 |
| 3528,948 | —107 | 0,71 | 1236 | 5,5 | 1,5 |
| 3528,972 | — 83 | 0,55 | 1202 | 4,2 | 1,2 |
| 3528,939 | —116 | 0,77 | 1252 | 6,1 | 1,7 |
| 3528,962 | — 93 | 0,62 | 1217 | 4,7 | 1,3 |
| 3528,947 | —108 | 0,72 | 1250 | 5,7 | 1,6 |
| 3528,014 | — 41 | 0,27 | 1089 | 1,9 | 0,5 |
| 3528,768 | —287 | 1,91 | 1487 | 17,9 | 5,0 |
| 3528,998 | — 57 | 0,38 | 1082 | 2,6 | 0,7 |
| 3528,867 | —188 | 1,25 | 1377 | 10,8 | 3,0 |
| 3529,041 | — 14 | 0,09 | 1015 | 0,1 | 0 |
| $D_{опт}$ 3529,055 | 2139 | | | | |

Фазовые искажения от внешних ЭМП не устраняются применяемой методикой снятия отсчетов и схемными регулировками и целиком входят в результат измерений.

При использовании формулы (11) фазовые искажения зависят не от длины измеряемой линии, а от энергетической плотности спектра помехового поля и частотной характеристики усилителя промежуточной частоты приемного тракта радиодальномера.

Распределение отклонений средних арифметических значений измерений, проведенных в условиях помех, от оптимизированной длины линии не подпадают нормальному закону распределения. По-видимому, наблюдается систематическая погрешность, значение и закономерность изменения которой необходимо найти в дальнейших исследованиях.

Список литературы: 1. Волков В. М., Иванько А. А. Нестационарные процессы в элементах фазометрических систем. — М.: Техника, 1977. 2. Дональд Р. Ж. Уайт. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств, т. 1. — М.: Сов. радио, 1977. 3. Евсиков Ю. А., Чапурский В. В.

Преобразование случайных процессов в радиотехнических устройствах. — М.: Сов. радио, 1977. 4. *Зенькович А. В.* Искажения частотно-модулированных колебаний. — М.: Советское радио, 1974. 5. *Князев А. Д.* Проблемы обеспечения совместной работы радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1971. 6. *Пестряков В. Б.* Фазовые радиотехнические системы. — М.: Сов. радио, 1969. 7. *Пулторак В. К., Кулагин Л. Ф.* Принцип действия и устройство геодезического дальномера ГЕТ-Б1. — РИО ВТС, 1964 г. 8. *Супьян В. Я.* Исследование погрешностей фазометров с умножением и преобразованием частоты. — Автореф. дис... канд. техн. наук, 1964. 9. *Фомин А. Ф.* Помехоустойчивость систем передачи непрерывных сообщений. — М.: Сов. радио, 1975. 10. *Чеботарев А. С.* Способ наименьших квадратов. — М.: Геодезиздат, 1957.

Работа поступила в редколлегию 4 мая 1979 года. Рекомендована кафедрой Львовского политехнического института.
