

37. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЛЧМ-ИОНОЗОНДА В ОДНОПОЗИЦИОННОМ РЕЖИМЕ

С.Я.Михайлов

Институт солнечно-земной физики, г.Иркутск

Аннотация. Однопозиционный режим работы предусматривает использование одной антенны на излучение и прием ЛЧМ-сигнала. Это обеспечивается импульсной модуляцией его амплитуды, что приводит к порождению собственных шумов ионозонда. В работе выполнено моделирование такого режима работы ЛЧМ-ионозонда. Получены оценки собственного отношения сигнал/шум. Даны рекомендации по оптимизации импульсной модуляции амплитуды и регистрации ЛЧМ-сигнала.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вертикальное зондирование ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом дает существенный выигрыш в отношении сигнал/шум по сравнению с многочастотным импульсным зондированием. Это позволяет на порядок снизить излучаемую мощность. Однако при использовании одной антенны на излучение и прием приходится вводить дополнительно импульсную модуляцию амплитуды ЛЧМ-сигнала. В результате ЛЧМ-ионозонд становится источником собственных шумов. Для минимизации собственных шумов актуальным является выбор наилучшего режима импульсной модуляции амплитуды ЛЧМ-сигнала. Экономичнее это решить моделированием работы ЛЧМ-зонда. Имитационным моделированием такая задача решалась в [1] с использованием для модуляции амплитуды периодических M и Q псевдослучайных последовательностей. Влияние ионосферы при этом имитировалось введением задержки и затухания принимаемого сигнала, что создает некоторую неуверенность в выводах цитируемой работы, а главное не дает ответов на характер амплитудных искажений ЛЧМ-сигнала. В данной работе результаты исследований [1] дополняются прямым моделированием работы однопозиционного ЛЧМ-зонда. Для задания ионосферного канала используется его передаточная функция, а для модуляции амплитуды - псевдослучайная последовательность максимального

периода, ограниченного разрядной сеткой вычислительной машины. Целью работы является оценка собственных шумов однопозиционного ЛЧМ-зонда при различных режимах импульсной модуляции ЛЧМ-сигнала и выработка рекомендаций по выбору режима удовлетворяющего минимуму собственных шумов.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОДНОПОЗИЦИОННОГО ЛЧМ-ИОНОЗОНДА

В однопозиционном режиме излучается амплитудно-модулированный ЛЧМ-сигнал

$$u_0(t) = A_0(t) \cos \phi_0(t), \quad \phi_0(t) = \omega_H \cdot t + \beta \cdot t^2 / 2, \quad (1)$$

где t - время, отсчитываемое от момента включения передатчика; ω_H - начальная циклическая частота; β - скорость нарастания циклической частоты. Импульсная модуляция амплитуды $A_0(t)$ определяется псевдослучайной последовательностью единиц и нулей. Единица соответствует излучению сигнала единичной амплитуды в течении элемента времени T , а ноль – молчанию такой же промежуток времени. Отраженный от ионосферы сигнал принимается в моменты молчания передатчика. В результате амплитуда принимаемого сигнала дополнительно модулируется функцией $A_1(t) = 1 - A_0(t)$, определяемой инверсией излученной псевдослучайной последовательности.

Вывод формул для моделирования зондирования непрерывным ЛЧМ-сигналом представлен в работе [2]. Амплитудную модуляцию принимаемого сигнала однопозиционным ЛЧМ-ионозондом нетрудно учесть в конечных результатах этой работы. В результате для моделирования работы однопозиционного ЛЧМ-ионозонда получим следующие выражения.

После гетеродинирования сжатием по частоте в приемнике на вход фильтра промежуточной частоты поступает сигнал промежуточной частоты с комплексной огибающей $\tilde{q}(t)$, определяемой следующими формулами:

$$q_{BX}(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau') A_0(t - \tau') \exp[i(\beta \tau'^2 / 2 - \omega_H \tau' - \beta \tau' t)] d\tau', \quad (2)$$

$$\tilde{q}(t) = A_1(t) q_{BX}(t) , \quad (3)$$

где $q_{BX}(t)$ - комплексная огибающая на входе приемника, $h(\tau')$ - импульсная характеристика канала связи.

Комплексную огибающую на выходе усилителя промежуточной частоты определим преобразованием интеграла Дюамеля для комплексных огибающих [2] к интегралу по спектрам подынтегральных функций

$$q(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{q}(t - \tau) q_{\phi}(\tau) d\tau = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{Q}(\omega) Q_{\phi}(\omega) \exp(-i\omega t) d\omega, \quad (4)$$

где $\tilde{Q}(\omega)$ - спектр комплексной огибающей (3), $q_{\phi}(\tau)$ - комплексная огибающая импульсной характеристики фильтра промежуточной частоты, а $Q_{\phi}(\omega)$ - ее спектр.

Ионограмма, как и при зондировании непрерывным ЛЧМ-сигналом, определяется вычислением спектра комплексной огибающей, вырезанной сдвигающимся временным окном $W(t - t_K)$. Ионозондом регистрируются модули спектров $|S^+(\Omega, t_K)|$, где

$$S^+(\Omega, t_K) = \int_{-\infty}^{\infty} W(t - t_K) \cdot q(t) \cdot e^{i\Omega t} \cdot dt, \quad (5)$$

а реализация вырезается нормированным окном $W(t) = A \cdot W'(t)$, у которого константа нормировки определяется выражением $A = 4 / \int_{-\infty}^{\infty} W'(t) \cdot dt$. При этом четвёрка компенсирует энергетические потери в сигнале, связанные с гетеродинированием, а интеграл компенсирует потери, связанные с формой окна. Ионограммы изображаются в шкалах групповых задержек $\tau = \Omega / \beta$ (или действующих высот отражения $h' = \tau \cdot c / 2$, c - скорость света) и текущих значений циклической частоты передатчика $\omega_K = \omega_H + \beta \cdot t_K$ (или частоты $f_k = (2\pi)^{-1} \omega_k$).

Для выполнения численного моделирования работы однопозиционного ЛЧМ-ионозонда форма временного окна в (5) и комплексная огибающая импульсной характеристики фильтра промежуточной частоты в (4) задавались теми же функциями, что и в [2]. Скорость нарастания циклической частоты выбиралась равной $\beta = 2\pi \cdot 10^6 \text{ Гц} / \text{сек}$ начиная с частоты $f_H = (2\pi)^{-1} \omega_H = 0.5 \text{ МГц}$. Тогда спектр (5)

соответствует отклику на эффективный зондирующий сигнал длительностью $\tau_T = 8\pi / (\beta \cdot T_0) = 40 \text{ мкс}$ при длительности временного окна $T_0 = 0.1 \text{ с}$.

При вертикальном зондировании передаточную функцию ионосферного канала можно задать коэффициентом отражения, то есть считать $H(\omega) = V(\omega)$, где V - коэффициент отражения сферической волны от произвольной сферически-слоистой ионосферы при нормальном падении ее на слои. Выбиралась достаточно сложная модель ионосферы, включающая в себя слои E, E_s, F_1, F_2 и мелкомасштабные неоднородности масштаба 5 км с экспоненциальным профилем частоты соударений электронов. Профили плазменной частоты и частоты соударений электронов такой модели показаны в [2]. Все формулы для их расчета представлены в [3]. Алгоритм вычисления коэффициента отражения для произвольной сферически-слоистой модели ионосферы представлен в [4].

Для заданной модели ионосферы частотная зависимость коэффициента отражения рассчитывалась на сетке частот с шагом $\Delta f = 20 \text{ Гц}$. Результаты вычислений модуля $|V|$ и половины аргумента $\phi = 0.5 \arg(V)$ коэффициента отражения в положительной области частот представлены в [2]. В отрицательной области частот передаточная функция определялась в соответствии с ее свойством, вытекающим из вещественности импульсной характеристики, $H(-\omega) = H^*(\omega) = V^*(\omega)$. Вычисление импульсной характеристики ионосферного канала $h(\tau')$ выполнялось БПФ передаточной функции с числом отсчетов $N = 1048576$. Вычисление интеграла (2) выполнялось дискретным преобразованием Фурье (ДПФ), а интегралов (4) и (5) - быстрым преобразованием Фурье (БПФ) с числом отсчетов $N = 1048576$ и $N = 8192$. При выбранном шаге сетки частот комплексная огибающая (или принимаемая реализация) (4) вычислялась с шагом $\Delta t = 2\pi\Delta f / \beta = 20 \text{ мкс}$.

Псевдослучайная последовательность единиц и нулей определялась операцией округления вещественных чисел в диапазоне $[0,1]$, вычисляемых генератором случайных чисел ЭВМ. Период последовательности ограничивался количеством бит четырехбайтового вещественного числа. Исследовалась импульсная модуляция амплитуды $A_0(t)$ псевдослучайной последовательностью с длительностями элемента

времени $T = 100, 400, 800 \text{ мкс}$. Очевидно, шаг оцифровки Δt принимаемой реализации должен быть в несколько раз меньше длительности элемента времени. В нашем случае на элемент минимальной длительности получалось пять отсчетов.

Результаты вычислений комплексных огибающих на выходе фильтра промежуточной частоты (4) при выше перечисленных длительностях элемента времени псевдослучайных последовательностей представлены на рис. 1. Из сравнения представленных реализаций следует, что сигнал приобретает существенные амплитудные и фазовые искажения, уменьшающиеся с увеличением длительности элемента времени псевдослучайной последовательности. Присутствует сигнал в среднем одинаковый интервал времени, независящий от элемента времени последовательности, что объясняется ее псевдослучайностью. Это означает, что средняя мощность принимаемого сигнала не зависит от длительности элемента времени последовательности.

На рисунке 2 представлены модельные ионограммы (5) вертикального зондирования непрерывным ЛЧМ-сигналом и амплитудно-модулированным псевдослучайной последовательностью с выше перечисленными длительностями элемента времени. Полоса фильтра промежуточной частоты выбиралась равной 40 кГц . Из сравнения ионограмм следует, что с переходом к импульсной модуляции ЛЧМ-сигнала ионозонд становится источником собственных шумов. Это приводит к утрате возможности регистрации слабых сигналов (в данном случае кратников прохождения межслоевой долины $E_s - F1$, хорошо заметных на ионограмме зондирования непрерывным ЛЧМ-сигналом (рис. 2 а) в окрестности частоты 3.4 МГц). Наиболее равномерно собственные шумы распределяются по ионограмме при длительности элемента времени последовательности равном 100 мкс и, как следствие, имеют наименьшие амплитуды. С увеличением длительности элемента времени последовательности собственные шумы растут по амплитуде и перераспределяются в область, непосредственно прилегающую к полезному сигналу. Кроме того, при длительности элемента времени последовательности 800 мкс появляются ложные кратники полезного сигнала (рис. 2 г). Отсюда следует рекомендация: длительность элемента времени псевдослучайной последовательности должна выбираться наименьшей, но не нарушающей надежность работы приемо-передающих устройств.

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

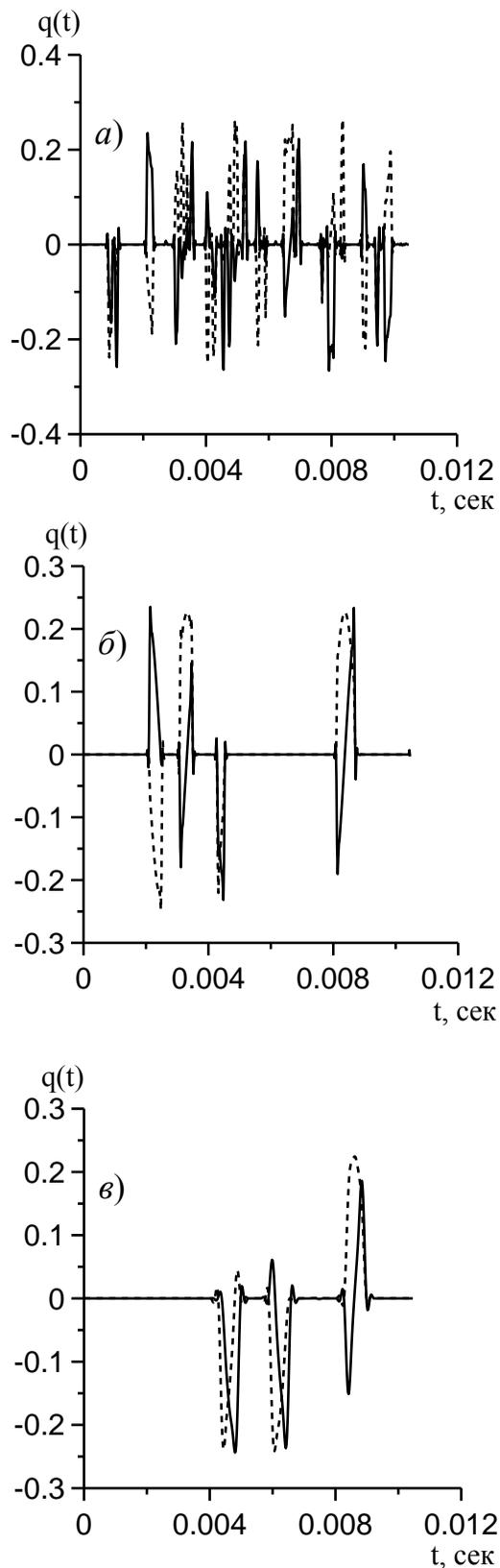


Рис. 1. Фрагменты комплексных огибающих при длительностях элемента времени псевдослучайных последовательностей: а - 100 мкс, б - 400 мкс и в - 800 мкс (сплошная кривая – реальная часть, пунктирная – мнимая часть).

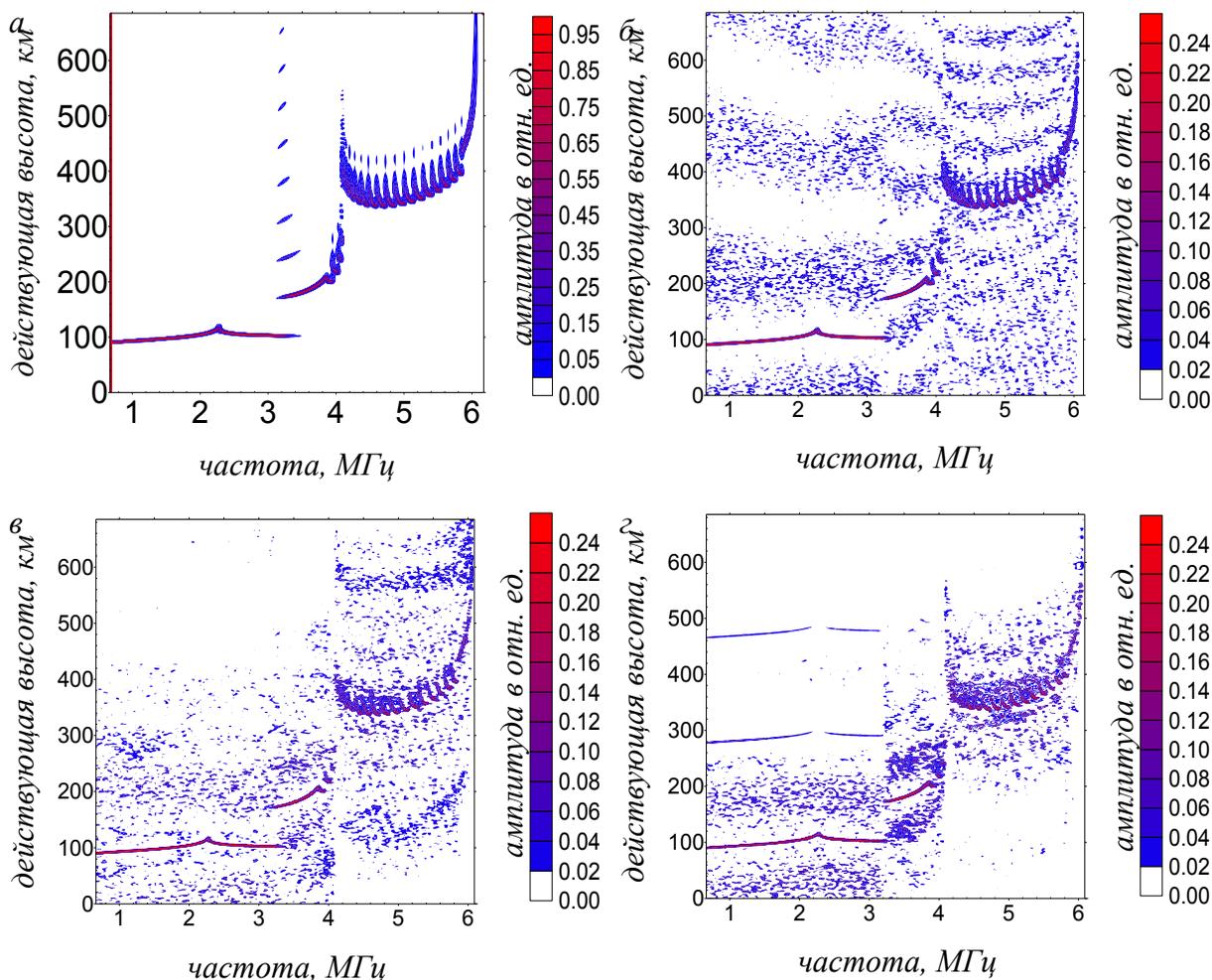


Рис. 2. Модельные ионограммы вертикального зондирования ЛЧМ-сигналом: а – непрерывным и амплитудно-модулированным псевдослучайной последовательностью с длительностями элемента времени б - 100 мкс, в - 400 мкс, г –800 мкс.

Наибольшее отношение сигнал/(собственный шум) получено при длительности элемента времени последовательности 100 мкс (рис. 2 б) и на частоте 2 МГц составило 15.5 ДБ. Очевидно, это отношение меняется в зависимости от частоты, поскольку максимальная амплитуда собственных шумов приблизительно постоянна, а амплитуда полезного сигнала меняется в зависимости от дисперсионных свойств ионосферного канала.

С переходом к импульсной модуляции ЛЧМ-сигнала амплитуда полезного сигнала уменьшается в четыре раза, что легко объяснить. Действительно, поскольку при импульсной модуляции сигнал излучается лишь половину времени, амплитуда его спектра уменьшается два раза. Отраженный от ионосферы сигнал принимается тоже лишь половину времени, поэтому на выходе приемника амплитуда его спектра уменьшается уже в четыре раза. Амплитуда же спектра внешних шумов падает в два

раза, так как помеха принимается половину времени. Поэтому для отношения сигнал/шум при импульсной модуляции следует выражение

$$20 \cdot Lg \frac{A_c}{4 \cdot 0.5 \cdot A_{ш}} = 20Lg \frac{A_c}{A_{ш}} - 6 \text{ ДБ}, \quad (6)$$

где A_c и $A_{ш}$ - максимальные амплитуды спектров сигнала и шума на выходе приемника при зондировании непрерывным ЛЧМ-сигналом. Отношение сигнал/шум при импульсной модуляции падает на 6 ДБ, что не согласуется с оценкой, выполненной в [1].

3. ВЫВОДЫ

Поскольку импульсная модуляция ЛЧМ-сигнала приводит к ухудшению собственных шумовых характеристик, то общие требования к конструкции однопозиционного ЛЧМ-ионозонда должны быть направлены на достижение трех преимуществ, оправдывающих его создание.

1. Компактность конструкции прибора.
2. Максимальное быстродействие.
3. Максимально возможное сокращение потока обрабатываемой информации без существенного ухудшения разрешающей способности.

Компактность прибора достигается использованием одной антенны, как на излучение, так и на прием и осуществлением строгой очередности режимов излучения и приема. Это приводит к необходимости использования импульсной модуляции излучаемого ЛЧМ-сигнала и дополнительной, сопряженной с ней, импульсной модуляции принимаемого сигнала.

Максимальное быстродействие достигается увеличением скорости нарастания частоты насколько это позволяет аппаратура. При моделировании скорость нарастания частоты выбрана 1 МГц/сек, что приводит при вертикальном зондировании ионосферы к времени одного скана 15 сек.

Поскольку при работе в однопозиционном режиме возникают жесткие требования к временному шагу оцифровки принимаемого сигнала, то сокращение времени одного скана приводит и к сокращению потока обрабатываемой на приеме информации.

Для достижения равномерного распределения по частотной оси шумов, создаваемых импульсным режимом излучения ЛЧМ-сигнала, последовательность излучаемых импульсов должна носить псевдослучайный характер, как по скважности, так и по длительности.

Как показало моделирование в нашем случае наилучшая равномерность распределения собственных шумов по частотной оси и наибольшее отношение

сигнал/шум достигается при длительности элементарной посылки псевдослучайной последовательности равной 100 мкс. Поэтому при регистрации элементарной посылки хотя бы в пяти отсчетах времени получаем шаг оцифровки 20 мкс. Шаг оцифровки определяется здесь свойствами излучаемого сигнала, а не полосой анализа регистрируемых задержек как это принято при работе с непрерывным ЛЧМ-сигналом.

Наиболее близко такой шаг оцифровки можно обеспечить на выходе усилителя промежуточной частоты 128 кГц с частотой оцифровки 102.4 кГц. Тогда квадратурные компоненты будут оцифрованы с частотой 51.2 кГц и шаг оцифровки по времени будет равен $1/51200 \sim 20$ мкс.

Полоса фильтра на входе усилителя промежуточной частоты может быть выбрана из требования к диапазону регистрируемых задержек сигнала. Если регистрировать максимальные действующие высоты отражения $h' = 900$ км при скорости нарастания частоты $(2\pi)^{-1}\beta = 10^6$ Гц/сек и скорости света $c = 3 * 10^5$ км/сек, то половина полосы фильтра промежуточной частоты получается равной $\Delta f = 2h'\beta / c = 6$ кГц.

Если работу однопозиционного ЛЧМ-ионозода приводить к эквиваленту зондирования импульсом длительностью 100 мкс, что соответствует протяженности его в пространстве 30 км, то разумным разрешением по групповому пути является 3 км или по задержке 10 мкс. Поэтому при вычислении спектров принимаемых ЛЧМ-сигналов разрешение по частоте равно $(10\text{мкс}) * \beta = 10$ Гц. Отсюда следует, что для вычисления спектров следует выбрать дискретное преобразование Фурье с числом отсчетов равным $N = 1/(20\text{мкс} * 10\text{Гц}) = 5000$ или быстрое преобразование Фурье по основанию два с числом отсчетов $N = 8192$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов В.А., Махмутов А.Н., Рябов Н.В., Елсуков А.А.* Моделирование однопозиционного вертикального ЛЧМ-ионозода с минимальной мощностью излучения. - Распространение радиоволн: сборник докладов XXI Всероссийской научной конференции в 2-х Т. - Йошкар-ола: МарГТУ, 2005, Т. 2, С. 340-344.
2. *Михайлов С.Я.* Ионозонд с линейной частотной модуляцией радиосигнала как измеритель импульсной характеристики и передаточной функции радиоканала. – Изв. вузов. Радиофизика, 2009, Т. 52, № 12, С. 933-944.
3. *Михайлов С.Я.* Дифракционные эффекты возбуждения межслоевых каналов произвольной сферически-слоистой изотропной ионосферы. - Солнечно-Земная физика. Иркутск: Изд-во СО РАН, 2005, Вып. 7, С. 110-124.
4. *Михайлов С.Я.* Моделирование сигнала, отраженного от произвольной сферически-слоистой изотропной ионосферы. - Солнечно-Земная физика. Иркутск: Изд-во СО РАН, 2005, Вып. 7, С. 100-109.